



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
POSGRADO EN CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA**

**Asociaciones de foraminíferos planctónicos de la boca del Golfo  
de California de 2015 a 2019 y su relación con la dinámica  
climático-oceánica.**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE:  
DOCTOR EN CIENCIAS  
(Geología marina)**

**PRESENTA:**

**Xinantecatl Antonio Nava Fernández**

**TUTOR PRINCIPAL:**

**Doctora María Luisa Machain Castillo**

(Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM)

**COMITÉ TUTOR:**

**Doctora María Adela Monreal Gómez**

(Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM)

**Doctor Raúl Aguirre Gómez**

(Instituto de Geografía, UNAM)

**Doctor Armstrong Altrin Sam John Selvamony**

(Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM)

**Doctor Abdelfettah Sifeddine**

(Institut de Recherche pour le Développement, IRD)

**MÉXICO, CD. MX., MARZO 2023**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



**Asociaciones de foraminíferos planctónicos de la boca del Golfo de California de 2015 a 2019 y su relación con la dinámica climático-oceánica.**

**TESIS**

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE:  
**DOCTOR EN CIENCIAS**  
(Geología marina)

PRESENTA:

**Xinantecatl Antonio Nava Fernández**

**TUTOR PRINCIPAL:**

**Doctora María Luisa Machain Castillo**

(Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM)

**COMITÉ TUTOR:**

**Doctora María Adela Monreal Gómez**

(Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM)

**Doctor Raúl Aguirre Gómez**

(Instituto de Geografía, UNAM)

**Doctor Armstrong Altrin Sam John Selvamony**

(Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM)

**Doctor Abdelfettah Sifeddine**

(Institut de Recherche pour le Développement, IRD)

**MÉXICO, CD. MX., MARZO 2023**

## **Agradecimientos académicos**

A la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y al Instituto de ciencias del Mar y Limnología (ICMyL), UNAM, por el financiamiento del proyecto y el tiempo de barco de las campañas oceanográficas MAZ I, II, III y IV.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo financiero (beca doctoral 361110). Así como al Posgrado de Ciencias del Mar y Limnología (PCML), UNAM y a su personal administrativo.

A mi directora de tesis, Dra. María Luisa Machain Castillo por la dirección del proyecto, por compartir sus conocimientos, comentarios y sugerencias. Así como, por la oportunidad y el espacio de trabajo en el Laboratorio de Micropaleontología y Paleoceanografía, ICMyL.

A mi comité tutorial, Dra. María Adela Monreal Gómez, Dr. Raúl Aguirre Gómez, Dr. Armstrong Altrin Sam John Selvamony y al Dr. Abdelfettah Sifeddine por sus oportunos comentarios y sugerencias para mejorar este proyecto.

A la University of South Carolina Aiken, Aiken, USA y a la School of the Earth Ocean and Environment, University of South Carolina, Columbia, USA, por su apoyo y colaboración en este proyecto, en especial a la Dra. Kelly Gibson y al Dr. Eric Tappa.

Al Institut de Recherche pour le Développement (IRD), Ciudad Universitaria, 04510, Mexico y al IRD, Sorbonne Université, CNRS, MNHN, IPSL, LOCEAN, ALYSES: Laboratoire d' Océanographie et du Climat: Experimentations et approches Numériques, Bondy, France, en especial a la Dra. Mercedes Méndez Millan y a la Dra. Sandrine Caquineau por su apoyo y colaboración en los análisis geoquímicos de carbono orgánico, nitrógeno total, Al, Ti, Fe y Zr.

A la tripulación del B/O El Puma por su apoyo y colaboración en las maniobras para la obtención de las muestras.

A la plataforma UNIMAR, en especial al M. en C León Felipe Álvarez Sánchez por su apoyo en la obtención y procesamiento de imágenes de satélite.

Al M. en C. Alejandro Rodríguez Ramírez por su apoyo en el procesamiento de las muestras.

A los M. en C. Carlos Alberto Herrera Becerril y Arturo Ronquillo Arvizu por su apoyo en la obtención y procesamiento de datos.

## **Agradecimientos personales**

Este trabajo está especialmente dedicado a mi familia, a mi hija Morelia Yunuén Nava Almaraz y a mi esposa Laura Almaraz Ruiz a quienes agradezco profundamente por su amor y cariño, porque gracias a su apoyo y confianza fue posible la realización de esta tesis.

A mi madre Eloísa Fernández García, a mi padre Tirso Nava Heredia y a mi hermana Cinthya Esther Nava Fernández por apoyarme en todo momento y por los ejemplos que me han ayudado a lo largo de la vida. También agradezco a toda mi familia (tíos, primos y sobrinos) por su apoyo incondicional.

A mis compañeros de laboratorio y amigos que siempre me han apoyado.

## Abstract

The response of planktonic foraminiferal (PF) assemblages, particle fluxes (total mass, organic carbon, total nitrogen, and carbonates) and terrigenous element fluxes (Al, Ti, Fe and Zr) to the seasonal and interannual changes in the atmospheric-oceanic dynamic was analyzed at the Mouth of the Gulf of California (MGC) in a sediment trap record from 2015 to 2019. Biweekly meteorological data of wind speed, precipitation, and riverine discharge, as well as data from satellite images (MODIS-AQUA) of Sea Surface Temperature (SST), and sea surface Chlorophyll-*a* concentration (Chl-*a*) were analyzed during the sampling period. The PF assemblages, particle fluxes and terrigenous element fluxes reflected the annual cycle of the atmospheric and ocean regime at the MGC, as well as the effects of the strong Godzilla El Niño 2015-2016 event. During neutral and La Niña years three oceanic sceneries were found: i) The winter-spring scenario was characterized by dry conditions, low Al, Ti, Fe and Zr fluxes, strong northwest winds that generated costal upwelling, low SST, increase of Chl-*a*, high particle fluxes, and the assemblage dominated by *Globigerina bulloides*. ii) The summer scenario was characterized by increase in precipitation that coincides with high Al, Ti, Fe and Zr fluxes, weak southwest winds, as well as high SST, low Chl-*a*, decreases of particle fluxes, and the PF assemblages dominated by the warm species *Globorotaloides hexagonus* and *Orbulina universa-Trilobatus sacculifer-Globigerinella siphonifera*. iii) The autumn scenario was characterized by the increase in the northwest wind speed, decrease in SST, increases in Chl-*a*, and high particle fluxes, with the assemblage dominated by the turbulence-resistant species *Globigerinita glutinata*. During the Godzilla El Niño the study area was influenced by anomalous warm and oligotrophic waters, as well as an anomalous increase in the precipitation and the north wind speed. This was reflected by the dominance of *Globigerinoides tenellus* assemblage and significant increases in Al, Ti, Fe and Zr fluxes. These results show the strong influence of El Niño Southern Oscillation (ENSO) on climatic-oceanic dynamic and PF assemblages at the MGC. This study helps to improve the interpretation in the sedimentary record of these anomalous warm and rainy events, which allows to have a better understanding of the long-term variations and effects of ENSO.

## Resumen

Se analizó la respuesta de las asociaciones de foraminíferos planctónicos (FP), flujos de partículas (masa total, carbono orgánico, nitrógeno total y carbonatos), y flujos de elementos indicadores de aporte terrígeno (Al, Ti, Fe y Zr) a los cambios estacionales e interanuales en la dinámica atmosférica y oceánica de la Boca del Golfo de California (BGC) de 2015 a 2019, en un registro de trampas de sedimento. Se analizaron datos meteorológicos quincenales de velocidad del viento, precipitación, descarga de ríos y datos de imágenes de satélite (MODIS-AQUA) de Temperatura Superficial del Mar (TSM) y concentración superficial de clorofila-*a* (Cl-*a*) durante el periodo de estudio. Las asociaciones de FP, flujos de partículas y los flujos de elementos indicadores de aporte terrígeno reflejaron el ciclo anual del régimen atmosférico y oceánico de la BGC, así como los efectos del fuerte evento El Niño Godzilla 2015-2016. Tres escenarios fueron encontrados durante años neutrales y de La Niña. i) El escenario de invierno y primavera fue caracterizado por condiciones de sequía, bajos flujos de Al, Ti, Fe y Zr, así como por fuertes vientos del noroeste que produjeron surgencias costeras, bajos valores de TSM, aumentos de Cl-*a*, mayores flujos de partículas y una asociación dominada por *Globigerina bulloides*. ii) El escenario de verano fue caracterizado por aumentos en la precipitación que coinciden con altos flujos de Al, Ti, Fe y Zr, vientos débiles del suroeste, así como con mayor TSM, menor Cl-*a*, disminución en los flujos de partículas y asociaciones dominadas por las especies cálidas *Globorotaloides hexagonus*, *Orbulina universa*, *Trilobatus sacculifer* y *Globigerinella siphonifera*. iii) El escenario de otoño se caracterizó por el incremento en la velocidad del viento del noroeste, disminución de la TSM y aumentos en la Cl-*a* y en los flujos de partículas, con la asociación dominada por la especie resistente a la turbulencia *Globigerinita glutinata*. Durante El Niño Godzilla el área de estudio fue influenciada por aguas anómalamente cálidas y oligotróficas, así como por un aumento anómalo en la precipitación y velocidad del viento del norte. Lo cual fue reflejado por la dominancia de la asociación *Globigerinoides tenellus* y por aumentos significativos en los flujos de Al, Ti, Fe y Zr. Estos resultados muestran la fuerte influencia de El Niño Oscilación del Sur (ENOS) sobre la dinámica climático-oceánica y las asociaciones de FP en la BGC. Este estudio ayuda a mejorar la interpretación en el registro sedimentario de estos eventos anómalamente cálidos y lluviosos, lo cual permite tener un mejor conocimiento de las variaciones y efectos de ENOS a largo plazo.

# Índice

<b>Capítulo 1: Introducción .....</b>	<b>9</b>
<b>Capítulo 2: Antecedentes y área de estudio .....</b>	<b>18</b>
<b>Capítulo 3: Planktonic foraminiferal assemblages and particle fluxes at the entrance of the Gulf of California highlight the effects of the strong El Niño 2015–2016.....</b>	<b>28</b>
<b>Capítulo 4: Variabilidad estacional e interanual del aporte de material terrígeno en la BGC de 2015 a 2019.....</b>	<b>41</b>
<b>Capítulo 5: Conclusiones generales .....</b>	<b>57</b>

## Índice de figuras

### Capítulo 1

Figura 1. Índice Multivariado ENSO (MEI) de 2015 a febrero de 2019.....	12
---	----

### Capítulo 4

Figura 1. Flujos de elementos Ti, Al, Fe y Zr de mayo de 2015 a febrero de 2019. ....	43
---	----

Figura 2. Precipitación quincenal en Mazatlán, descarga quincenal de los ríos Presidio, Baluarte, Quelite y la sumatoria de estos tres de enero de 2015 a febrero de 2019.....	44
--	----

Figura 3. Índice Multivariado ENSO, precipitación quincenal en Mazatlán, descarga quincenal del río Presidio, velocidad del viento y flujos de Ti, Al, Fe y Zr de enero de 2015 a febrero de 2019.....	47
--	----

Figura 4. Precipitación quincenal en Mazatlán, descarga quincenal del río Presidio, magnitud del viento, proporción Zr/Al y Ti/Al de 2015 a 2019. ....	49
--	----

## Índice de tablas

Tabla 1. Muestra el número de Depresiones Tropicales (DT), Tormentas Tropicales (TT) y Huracanes, así como la fase de ENOS de 2015 a 2018 (datos tomados de CONAGUA 2015-2018). El Niño de tipo Pacífico oriental (PO), El Niño de tipo Pacífico central (PC). ....	51
---	----

# Capítulo 1

## Introducción

El conocimiento del comportamiento climático es importante porque afecta diferentes actividades humanas. El clima presenta variabilidad a distintas escalas de tiempo, ya sea por cambios estacionales, interanuales, decadales, seculares, milenarios y a mayor escala. Esta variabilidad se expresa en sus diferentes variables como son los regímenes de viento, precipitación, temperatura y diferencias de presión atmosférica, entre otras. Uno de los factores importantes de la variabilidad en el clima son las corrientes marinas superficiales, ya que la interacción océano-atmósfera determina los patrones de temperatura superficial del mar (TSM), salinidad, procesos de mezcla, surgencias y productividad primaria.

El fenómeno de El Niño Oscilación del Sur (ENOS) afecta los patrones de precipitación, regímenes de viento, la distribución de la TSM y la productividad primaria superficial en el Pacífico Tropical Oriental (PTO) (Amador *et al.*, 2006; Fiedler y Talley, 2006) a una escala de tiempo que varía de 2 a 7 años, sin que actualmente se sepa su periodicidad y duración exacta. El conocimiento detallado sobre su periodicidad, duración y efectos en la superficie del océano es de gran importancia desde un punto de vista climático, oceánico, económico y social. Una forma de conocer su periodicidad e intensidad es analizar su registro en los componentes biológicos y geoquímicos que se encuentran en las masas de agua superficiales y su preservación en los sedimentos del fondo marino a diferentes escalas temporales.

Una herramienta útil para la comprensión de la variabilidad climática del PTO es el análisis de las poblaciones de foraminíferos planctónicos (FP) ya que son un grupo de organismos estrechamente relacionados con las condiciones de las masas de agua en las que habitan, reflejando cambios en la dinámica oceánica y climática no sólo en el presente, sino a través del tiempo, puesto que sus caparazones duros son susceptibles de formar parte del registro sedimentario. Los cambios en sus patrones de abundancia, diversidad y composición isotópica indican variaciones en la dinámica oceánica y climática en el registro paleoceanográfico (Bé y Tolderlund, 1971; Ravelo y Hillaire-Marcel, 2007; Reynolds y Thunell, 1992; Machain-Castillo *et al.*, 2008; Wejnert *et al.*, 2010). El uso de los FP como proxy biológico puede ayudar a comprender y delimitar la variabilidad en la periodicidad y los efectos de fenómenos como el ENOS.

El Golfo de California (GC), que forma parte del PTO, es un buen escenario para estudiar la variabilidad climática, en particular la boca del GC (BGC) frente a las costas de Mazatlán, Sinaloa, zona de transición entre las corrientes frías que se originan en altas latitudes y las corrientes cálidas de origen ecuatorial. Aquí se puede observar la incidencia de ENOS en sus distintas fases, que producen distintos efectos como son cambios en la distribución de las corrientes superficiales, la TSM, la intensidad de las surgencias y la productividad primaria superficial de la región interanualmente (Fiedler y Talley, 2006). Esta variabilidad climática y oceánica en el GC repercute en distintos sectores sociales como son las pesquerías, la agricultura y el tránsito marítimo entre otros, por lo que su estudio es relevante.

Actualmente, además de no conocerse con precisión la periodicidad y duración exacta de ENOS, se desconoce como responden las poblaciones de FP a las condiciones oceánicas y climáticas cambiantes en esta importante zona de transición oceanográfica (específicamente en la BGC), no sólo a nivel intra sino interanual. Una forma de resolver este problema es el obtener poblaciones de foraminíferos de la forma más continua posible y relacionar sus poblaciones con factores ambientales como la TSM, productividad primaria, los patrones de circulación oceánica y el viento, entre otros. Para ello se planteó el estudio de los FP recolectados mediante el uso de trampas de sedimentos, con las cuales se obtienen registros continuos de alta resolución (semanales a quincenales).

Cada muestra corresponde a un periodo de tiempo conocido, que puede ser correlacionada directamente con valores de velocidad del viento, precipitación, TSM,  $Cl-a$  que se obtienen de imágenes satelitales o de mediciones *in situ*. Para saber cómo son los efectos y la periodicidad de ENOS, las asociaciones de FP encontradas en las trampas son comparadas con índices de la variabilidad interanual como el Índice Multivariado ENSO (MEI, por sus siglas en inglés) o el Índice de la Oscilación del Sur (IOS) en conjunto con los parámetros antes mencionados; de esta forma es posible analizar las variables desde una perspectiva integral.

Una vez conocidas las características de las asociaciones de FP en diferentes escenarios oceanográficos, delimitados a través de los registros instrumentales arriba mencionados (CTD, imágenes de satélite, datos de vientos), los FP se podrán utilizar para reconstruir en el registro

sedimentario dichos parámetros y escenarios a través del tiempo y conocer cuándo se han presentado fenómenos como el ENOS, entre otros.

Otra estrategia útil para entender la variabilidad climática es analizar la composición geoquímica del sedimento, ya que aporta información importante para entender la variabilidad oceánica y climática en términos de productividad y procedencia. Los análisis geoquímicos de Carbono orgánico ( $C_{org}$ ) y Nitrógeno total ( $N_{total}$ ) son indicadores de la productividad ya que son producto directo de la productividad primaria y su concentración en los sedimentos, aunque no es igual a la que se produce en la superficie, permite inferir las condiciones de productividad primaria de aguas superficiales (Thunell, 1998; Ruhlemann *et al.*, 1999). En cuanto al origen de la materia orgánica, la proporción C:N puede indicar si la fuente es marina (con valores que van de 6 a 8) o bien, si la fuente es continental (con valores mayores a 20) (Thunell, 1998; Collins *et al.*, 2011; Briceno-Zuluaga *et al.*, 2016).

Otro aspecto importante de la variabilidad climático-oceánica de la BGC que puede ser inferida por indicadores geoquímicos son, los patrones de precipitación y aportes fluviales en la cuenca. La concentración de elementos como Al, Ti, Fe y Zr indican la procedencia del material terrígeno que forma parte del sedimento, ya que estos elementos son mayoritarios en la corteza continental y su proporción es relativamente constante (Calvert y Pedersen, 2007), por lo que el aumento de sus concentraciones en el sedimento marino refleja cambios en la escorrentía y aporte fluvial (Haug *et al.*, 2001; Sifeddine *et al.*, 2008; Ruiz Fernández *et al.*, 2009; Armstrong-Altrin *et al.*, 2012).

En el presente estudio se pretende documentar la variación de parámetros ambientales como la TSM,  $Cl-a$ , velocidad del viento y precipitación entre 2015 y 2019 en la BGC. Se propone analizar cómo influye el ENOS en sus diferentes fases sobre dichos parámetros y como es que estos cambios influyen a las asociaciones de FP y a la composición geoquímica del sedimento durante el periodo de muestreo.

El periodo de muestreo (2015–2019) incluyó diferentes escenarios oceánicos y climáticos (ENOS en sus diferentes fases: neutral, positiva y negativa (Fig. 1) (Climate Prediction Center, 2022). Entre estas condiciones destaca el periodo de junio de 2015 a mayo de 2016 en el que se presentó un periodo El Niño con anomalías positivas de TMS hasta de 2.6 °C, lo que lo clasifica como un Niño

fuerte (Rasmusson y Carpenter, 1982), comparable en intensidad con los eventos El Niño 1982–1983 y 1997–1998, en los que se alcanzaron anomalías positivas de 2.3 y 2.4 °C (Climate Prediction Center, 2022) respectivamente. Estos eventos tuvieron efectos en distintos ámbitos, como son el aumento en la TSM, la profundización de la termoclina, la disminución de la productividad primaria superficial y cambios en la incidencia de huracanes de mayor intensidad (<http://smn.cna.gob.mx>; Coria-Monter et al. 2018; Ortiz-Ahumada et al. 2018).

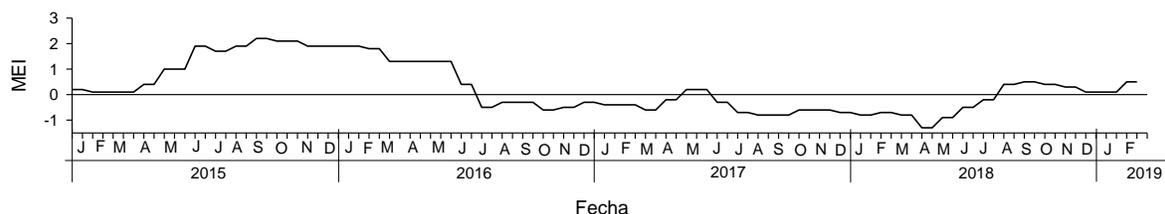


Figura 1. Índice Multivariado ENSO (MEI) de 2015 a febrero de 2019.

### Justificación

La importancia de este estudio consiste en incrementar el conocimiento de la dinámica oceánica y climática de la BGC y la influencia de ENOS, cuyos efectos atañen directamente las actividades antrópicas de esta importante zona de transición oceanográfica. Las contribuciones al conocimiento son: a) Se documentó mediante registros instrumentales la variabilidad estacional e interanual (ENOS) de algunos factores ambientales atmosféricos y oceánicos, tales como velocidad del viento, precipitación, descarga de ríos, TSM,  $Cl-a$  y MEI de 2015 –2019. b) Se identificaron los efectos (señales) que tienen dichos factores sobre las asociaciones de FP y la composición geoquímica del sedimento, c) Se aporta conocimiento sobre cómo estas señales podrían registrarse en los sedimentos, lo cual ayuda a mejorar la interpretación del registro sedimentario en reconstrucciones paleoceanográficas.

Como se mencionó en el primer párrafo los ciclos en el clima ocurren a distintas escalas temporales, por lo tanto, este estudio ayuda a sentar las bases para futuras reconstrucciones paleoceanográficas y la calibración de indicadores paleoclimáticos. Lo anterior es de gran importancia, para conocer mejor el comportamiento del clima a largo plazo y las diferencias entre las tendencias climáticas de

las últimas décadas (donde han ocurrido fuertes cambios que han afectado a distintos sectores sociales y que presumiblemente contiene una fuerte influencia antrópica) y en períodos anteriores donde no ha habido impacto antropogénico.

### **Preguntas de investigación**

¿Cómo es la señal de ENOS sobre las asociaciones de FP de 2015 a 2019 en la BGC?

Se espera que las asociaciones de FP se modifiquen en su abundancia, diversidad y/o composición taxonómica durante las distintas fases de este fenómeno.

¿Cuál es el efecto de ENOS sobre la productividad inferida por la composición geoquímica del material recolectado en las trampas de sedimento?

Se espera que, durante las fases de este fenómeno, ocurran cambios en la composición geoquímica del sedimento que indiquen variaciones en la productividad de la zona.

¿Cómo varían la velocidad del viento, precipitación, aporte de ríos, TSM, *CI-a* y el MEI de 2015 a 2019?

Se espera que dichas variables se modifiquen durante las distintas fases de ENOS.

¿Cómo varían los flujos de elementos indicadores de aporte terrígeno (Al, Ti, Fe y Zr) de 2015 a 2019?

Se espera que los aportes de material terrígeno presenten una correlación con los cambios estacionales e interanuales de los aportes fluviales y eólicos.

### **Objetivo general**

Analizar las asociaciones de FP, la geoquímica del sedimento (masa total, carbono orgánico, nitrógeno total, carbonatos y flujos de Al, Ti, Fe y Zr) y su respuesta a la variabilidad de la velocidad del viento, precipitación, TSM y *CI-a* con y sin la presencia de ENOS de 2015 a 2019 en la BGC.

## **Objetivos particulares**

### ***Capítulo 3***

- Identificar las asociaciones de FP en trampas de sedimento de 2015 a 2019.
- Conocer cuál es la variación de la velocidad del viento, TSM, Cl-*a* y el MEI durante el periodo de muestreo, mediante series de tiempo de dichos parámetros.
- Reconocer variaciones en la productividad mediante análisis geoquímicos de Carbono orgánico y Nitrógeno total.
- Relacionar las asociaciones de FP con todos los parámetros analizados

### ***Capítulo 4***

- Analizar los cambios en la cantidad del material terrígeno en las trampas, mediante el análisis elemental de Al, Ti, Fe y Zr.
- Conocer los patrones de precipitación y descargas de ríos durante el periodo de muestreo, mediante series de tiempo de dichos parámetros.
- Relacionar lo anterior con las diferentes fases del ENOS de 2015 a 2019.

## Bibliografía

- Amador, J.A., Alfaro, E.J., Lizano, O.G., Magaña, V.O., 2006. Atmospheric forcing of the eastern tropical Pacific: A review. *Prog. Oceanogr.* 69, 101–142. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.pocean.2006.03.007>
- Armstrong-Altrin, J.S., Lee, Y.I., Kasper-Zubillaga, J.J., Carranza-Edwards, A., Garcia, D., Eby, N., Balaram, V., Cruz-Ortiz, N.L., 2012. Geochemistry of beach sands along the western Gulf of Mexico, Mexico: implication for provenance. *Chem. Erde Geochem.* 72, p. 345-362.
- Bé, A. W. H., Tolderlund, D.S., 1971. Distribution and ecology of planktonic foraminiferal in surface waters of the Atlantic Indian Oceans, in: Funnell, B. and Riedel, W. (Ed.), *The Micropaleontology of Oceans*. Cambridge University Press, London, pp. 105–150.
- Briceno-Zuluaga, F. J., Sifeddine, A., Caquineau, S., Cardich, J., Salvattecchi, R., Gutierrez, D., Ortlieb, L., Velazco, F., Boucher, H. y C. Machado. 2016. Terrigenous material supply to the Peruvian central continental shelf (Pisco, 14 S) during the last 1000 years: paleoclimatic implications. *Climate of the Past*, 12: 787-798.
- Calvert S. E. y T. F. Pedersen. 2007. Paleooceanographic variability in marine sediments: interpretation and application. En: *Proxies in Late Cenozoic Paleooceanography*. Hillare-Marcel Y Vernal. *Elsevier*. 567-644 p.
- Climate Prediction Center Internet Team, 2022. Cold & Warm Episodes by Season [WWW Document]. NOAA/ Natl. Weather Serv. Natl. Centers Environ. Predict. Clim. Predict. Cent. URL [https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis\\_monitoring/ensostuff/ONI\\_v5.php](https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php) (accessed 5.14.22).
- Collins, L.E., Berelson, W., Hammond, D.E., Knapp, A., Schwartz, R., Capone, D., 2011. Particle fluxes in San Pedro Basin, California: A four-year record of sedimentation and physical forcing. *Deep. Res. Part I Oceanogr. Res. Pap.* 58, 898–914. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2011.06.008>
- Coria-Monter, E., Monreal-Gómez, M.A., De León, D.A.S., Durán-Campos, E., 2018. Impact of the “godzilla El Niño” Event of 2015-2016 on Sea-Surface Temperature and Chlorophyll-*a* in the

- Southern Gulf of California, Mexico, as Evidenced by Satellite and *in Situ* Data. *Pacific Sci.* 72, 411–422. <https://doi.org/10.2984/72.4.2>
- Fiedler, P.C., Talley, L.D., 2006. Hydrography of the eastern tropical Pacific: A review. *Prog. Oceanogr.* 69, 143–180. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2006.03.008>
- Haug G., Hughen, K., Sigman D., Peterson L., Rohl U., 2001. Southward migration of the intertropical convergence zone through the Holocene. *Science* 293, 1304–1308.
- Machain-Castillo, M.L., Monreal-Gómez, M.A., Arellano-Torres, E., Merino-Ibarra, M., González-Chávez, G., 2008. Recent planktonic foraminiferal distribution patterns and their relation to hydrographic conditions of the Gulf of Tehuantepec, Mexican Pacific. *Mar. Micropaleontol.* 66, 103–119. <https://doi.org/10.1016/j.marmicro.2007.08.003>
- Ortiz-Ahumada, J.C., Álvarez-Borrego, S., Gómez-Valdés, J., 2018. Efectos de eventos estacionales e interanuales en la biomasa y producción fitoplanctónicas derivadas de satélite en el extremo sur del Sistema de la Corriente de California en el periodo 2003-2016. *Ciencias Mar.* 44, 1–20. <https://doi.org/10.7773/cm.v44i1.2743>
- Ravelo A. C., Hillarie – Marcel C., 2007. The Use of Oxygen and Carbon Isotopes of Foraminifera in Paleoceanography, En: Hillarie – Marcel C., de Vernal, A. (Eds.), *Proxies in Late Cenozoic Paleoceanography*. Elsevier, Amsterdam. V. 1, Cap. 18, p. 735-764.
- Reynolds S. L., Sancetta C., 1992. Seasonal associations of phytoplankton and planktic foraminifera in an upwelling region and their contribution to the seafloor. *Marine Micropaleontology*. V 18, p. 263-278.
- Ruhlemann C., Muller P., and Schneider. 1999. Organic Carbon and carbonate as paleoproductivity proxies: Examples from high and low productivity areas of the Tropical Atlantic. In Fisher and Wefer, 1999 *Use of proxies in paleoceanography: Examples from the South Atlantic*. Springer-Berlag Berlin.
- Ruiz-Fernández, A. C., Hillaire-Marcel, C., de Vernal, A., Machain-Castillo, M. L., Vásquez, L., Ghaleb, B., Aspiazú-Fabián, J. A., y F. Páez-Osuna. 2009. Changes of coastal sedimentation in the Gulf of Tehuantepec, South Pacific Mexico, over the last 100 years from short-lived radionuclide measurements. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 82: 525-536.

Thunell, R. C., 1998a. Seasonal and annual variability in particle fluxes in the Gulf of California: A response to climate forcing. *Deep. Res. Part I Oceanogr. Res. Pap.* 45, 2059–2083. [https://doi.org/10.1016/S0967-0637\(98\)00053-3](https://doi.org/10.1016/S0967-0637(98)00053-3)

Thunell, R.C., 1998b. Particle fluxes in a coastal upwelling zone: Sediment trap results from Santa Barbara Basin, California. *Deep. Res. Part II Top. Stud. Oceanogr.* 45, 1863–1884. [https://doi.org/10.1016/S0967-0645\(98\)80020-9](https://doi.org/10.1016/S0967-0645(98)80020-9)

Wejnert, K.E., Pride, C.J., Thunell, R.C., 2010. The oxygen isotope composition of planktonic foraminiferal from the Guaymas Basin, Gulf of California: Seasonal, annual, and interspecies variability. *Mar. Micropaleontol.* 74, 29–37. <https://doi.org/10.1016/j.marmicro.2009.11.002>

## Capítulo 2

### Antecedentes y área de estudio

#### Antecedentes

Los FP responden a cambios en las condiciones de las masas de agua en las que habitan, debido a que estos organismos tienen límites de tolerancia a variables como temperatura, salinidad y productividad primaria (Bé y Tolderlund, 1971; Ravelo y Hillaire-Marcel, 2007; Reynolds y Thunell, 1992; Machain–Castillo *et al.*, 2008), de tal forma que las poblaciones se modifican en función de dichas variables y su distribución refleja la de las masas de agua. En el área de estudio la distribución de las masas de agua varía estacionalmente e interanualmente con la incidencia de ENOS (Lavín *et al.*, 2003; Fiedler y Talley, 2006; Lavín *et al.*, 2003; Pennington *et al.*, 2006; Álvarez–Borrego, 2010), por lo que las asociaciones de FP pueden utilizarse como indicadores de este fenómeno en la región, como se ha reportado en el Gofo de Tehuantepec (Nava–Fernández, 2013).

En diferentes áreas del PTO y otras regiones, se han hecho estudios en los que se ha analizado la respuesta de los FP a los cambios estacionales e interanuales en la hidrografía, como en las cuencas de Santa Bárbara (Kincaid *et al.*, 2000; Black *et al.*, 2001), San Pedro (Reynolds y Sancetta, 1992), Guaymas (Wejnert *et al.*, 2010), Golfo de Tehuantepec (Machain–Castillo *et al.*, 2008; Nava–Fernández, 2013; Gibson *et al.*, 2016), Golfo de Panamá (Thunell y Reynolds, 1984) y la cuenca de Cariaco (Tedesco y Thunell, 2003) entre otros. En dichos estudios se ha encontrado que las poblaciones de foraminíferos responden a cambios estacionales e interanuales en las condiciones oceánicas. Esta respuesta consiste en cambios en la composición taxonómica de las asociaciones, su abundancia y diversidad, presentándose asociaciones características de los diferentes escenarios oceanográficos. Por ejemplo, estudios en la Cuenca de Santa Bárbara, California en trampas de sedimento, reportan que en las asociaciones de FP en épocas de surgencias entre 1993 y 1998 (primavera e inicios del verano) la especie dominante es *Globigerina quinqueloba* y durante la época de estratificación (otoño e inicios de invierno) las especies *Globigerina bulloides*, *Neogloboquadrina pachyderma* y *N. dutertrei* son las más abundantes (Kincaid *et al.*, 2000).

Con respecto a las modificaciones introducidas por el fenómeno ENOS, Black *et al.* (2001) en la cuenca de Santa Bárbara, California, encontraron que durante las condiciones El Niño 1993-1994 y

1997-1998 se presentó un aumento anómalo en la TSM, acompañado de la especie de FP *Globigerinoides ruber* cuya presencia está restringida a periodos El Niño.

Davis *et al.*, (2021) analizaron la variación estacional e interanual de los FP de 1991 a 1997 mediante trampas de sedimento en la cuenca de Guaymas y encontraron que el ENOS modifica la estructura comunitaria de los FP, ya que en su fase positiva (El Niño) el calentamiento superficial y la disminución de la productividad primaria favorecen la dominancia de las especies *G. menardii* y *G. ruber*, que son las especies más abundantes en verano, quedando restringida la dominancia de *G. bulloides* (dominante durante el invierno en años normales).

La importancia de estos estudios radica en que se documentó la variabilidad climática y oceánica, la influencia de ENOS sobre dicha variabilidad y la señal que tienen sobre las poblaciones de FP en estas regiones, por lo que pueden utilizarse como herramientas para la interpretación de registros en otras áreas.

En las cuencas de Guaymas (Thunell *et al.* 1993; Thunell, 1998 a), Santa Bárbara (Thunell, 1998 b) y San Pedro (Collins *et al.*, 2011) se analizó la variación estacional e interanual de la productividad primaria de dichas cuencas mediante análisis geoquímicos e isotópicos en muestras de trampa de sedimentos. Estos autores utilizaron indicadores de productividad como el  $C_{org}$  y  $N_{total}$  y encontraron que durante las épocas de surgencias aumentan sus concentraciones debido al efecto fertilizador de las mismas. Por otra parte, encontraron que los valores de la proporción C:N reflejan la procedencia de la materia orgánica, la cual es principalmente de una fuente marina, lo que sugiere que los cambios en la productividad primaria que se registra en las trampas de sedimento se deben principalmente a variaciones estacionales en la actividad de las surgencias. A una escala interanual dicha variación se modifica por la presencia de ENOS, siendo menos productiva durante la fase positiva de este fenómeno.

En el Golfo de California y áreas cercanas se han analizado las variaciones en el régimen de precipitación y de viento a escalas milenarias y glacial-interglacial mediante el análisis de secuencias sedimentarias, que fueron interpretadas a través de indicadores geoquímicos como análisis elemental, específicamente con elementos indicadores de aporte terrígeno como Ti, Al, Zr, Fe y K, ente otros (Molina-Cruz *et al.* 2002; Blanchet *et al.* 2013; Perez-Cruz 2013; Velázquez-Aguilar 2019).

Las variaciones en el aporte de material terrígeno a escalas estacionales e interanuales se han documentado mediante registros de trampa de sedimentos en el Golfo de California. En la cuenca de Guaymas, Thunel et al. (1993) y Thunel (1988) analizaron un registro continuo de 1991 a 1997 y encontraron que el flujo de material terrígeno (masa total menos ópalo biogénico) aumenta durante la temporada de lluvias; mientras que, durante la temporada de estiaje el aporte terrígeno es menor. Las variaciones en este patrón anual fueron relacionadas con el fenómeno de El Niño 1992-1993, cuando se observó un aumento anómalo en el flujo de material terrígeno relacionado con aumentos en la precipitación. En la cuenca Alfonso, Silverberg et al. (2007) analizaron la variación estacional e interanual en el aporte de material terrígeno en un registro de 2002 a 2004 mediante el análisis elemental (Fe, Sc, Co y Cs, entre otros) y el flujo de masa total. Encontraron que los flujos de material terrígeno aumentaron durante la temporada de lluvias (verano); mientras que, durante la temporada de estiaje (invierno) el aporte de material terrígeno disminuyó. En este registro se observó el impacto de los huracanes “Ignacio” y “Marty”, que consistió en aumentos puntuales en la precipitación durante el verano de 2003, y fueron reflejados como aumentos anómalos en los flujos de elementos indicadores de aporte terrígeno.

Los sitios mencionados anteriormente, se encuentran en dominios claramente subtropicales (Guaymas). Aún falta documentar la variabilidad climática y oceánica, así como los efectos de ENOS sobre las asociaciones de FP y su composición geoquímica en distintas regiones del Pacífico mexicano. Una de estas regiones es la BGC, que es una zona de transición, estratégica e importante, porque es la zona de transición donde se forma un frente en el que confluyen masas de agua subtropicales y tropicales. La presencia y distribución latitudinal de estas masas se ve afectada por ENOS: en su fase positiva hay una mayor intrusión hacia el norte de aguas superficiales cálidas de origen ecuatorial y en su fase negativa se presenta una intrusión hacia el sur de aguas superficiales frías de origen subtropical (Fiedler y Talley, 2006), sin que se haya documentado en detalle cual es el alcance latitudinal del ENOS, ni su relación con la intensidad del mismo, ni si las repercusiones en las variables físico-químicas y biológicas son de la misma magnitud que en las áreas antes mencionadas.

## Área de estudio

El Golfo de California (GC) es un mar marginal semicerrado que se localiza al noroeste de la República mexicana, en la parte sur del golfo hay comunicación directa con el Océano Pacífico; mientras que, al norte limita con la desembocadura del río Colorado (Lavín *et al.*, 1997). El GC forma parte del PTO y su dinámica climática y oceánica es influenciada por distintos factores a escalas estacionales e interanuales (Amador *et al.*, 2006; Fiedler y Talley, 2006; Kessler, 2006).

Geográficamente el golfo ha sido dividido en cinco regiones: Alto golfo (AtGC), Norte del GC (NGC), la zona de islas (Archipiélago), Sur del golfo, (SGC) y la boca del golfo (BGC) (Lavín y Marinone, 2003). A lo largo del eje longitudinal del golfo (de norte a sur) se distribuyen una serie de cuencas cuya profundidad va aumentando hacia el sur (Lavín *et al.*, 1997).

La circulación oceánica superficial del GC es determinada por la circulación atmosférica de PTO (Fiedler y Talley, 2006) la cual presenta un patrón estacional producido por el desplazamiento latitudinal de la posición del centro de baja presión donde convergen los vientos alisios, conocido como Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), dicho desplazamiento sigue anualmente a la región de mayor insolación solar (Amador *et al.*, 2006).

Durante los meses de invierno y primavera boreal la posición sur de la ZCIT produce el flujo de la Corriente de California (CC) hacia el Ecuador, que alcanza la BGC (Amador *et al.*, 2006; Fiedler y Talley, 2006; Portela *et al.*, 2016), mientras que, durante el verano y el otoño boreal, la posición norte de la ZCIT genera un flujo de aguas ecuatoriales hacia el polo, que restringe hacia el norte a la CC y permite el arribo de la Corriente Costera Mexicana (CCM) a la BGC (Lavín *et al.*, 2006; Lavín *et al.*, 2009; Portela *et al.*, 2016).

De acuerdo con Portela *et al.* (2016), las masas de agua presentes en la BGC son:

- AGC Agua del Golfo de California ( $S \geq 35.1$   $T \geq 12$ ) 0–150 m
- ATS Agua Tropical Superficial ( $S < 34.6$   $T \geq 25.1$ ) 0–50 m
- ACC Agua de la Corriente de California ( $S < 34.6$   $T 10–21$ ) 0–150 m
- ASsSt Agua Subsuperficial Subtropical ( $S 34.6–35.1$   $T 9–18$ ) 75–400 m
- AIP Agua Intermedia del Pacífico ( $S 34.6–35.1$   $T 4–9$ ) 400–1000 m

- APP Agua Profunda del Pacífico ( $S > 34.6$   $T < 4$ )  $> 1000$  m

La distribución de las masas de agua superficiales presenta variación estacional en el GC, dicha variación está relacionada con la influencia meteorológica (Lavín *et al.*, 1997 y Portela *et al.*, 2016). La BGC representa la vía de entrada y salida de las corrientes que transportan a estas masas de agua. En esta zona convergen tres masas de agua superficiales (ATS, ACC, AGC) cuya convergencia se manifiesta como frentes estacionales (Lavín *et al.*, 1997 y Portela *et al.*, 2016). En la BGC durante el invierno y primavera las masas de agua con mayor presencia son el ACC y AGC; mientras que, en el verano y otoño la masa de agua dominante es ATS (Portela *et al.*, 2016). El ENOS altera este patrón estacional, como ocurrió durante el Niño 1982–1983 en el que se registró una intrusión exagerada del ATS en el GC (Lavín *et al.*, 1997).

La productividad primaria superficial del GC es determinada por surgencias costeras y remolinos oceánicos, entre otros factores (Álvarez–Borrego, 2010). Las surgencias se producen estacionalmente por la acción de los vientos; durante los meses de invierno y primavera los vientos dominantes son del noroeste y son paralelos al eje del GC (Amador *et al.*, 2006), lo que genera surgencias altamente productivas en la costa oriental del golfo, frente a las costas de Sinaloa en la BGC; mientras que, durante los meses de verano y otoño la dirección del viento es del sureste, generando surgencias en la costa occidental del golfo, las cuales estimulan una menor productividad primaria con respecto a las surgencias de invierno y primavera (Álvarez – Borrego, 2010).

Otro factor que ejerce variabilidad en cuanto a la distribución de la temperatura y la productividad primaria en el GC es la presencia de remolinos oceánicos, debido a que su dinámica genera movimientos verticales en la columna de agua (Emilsson y Alatorre, 1997; Lavín y Marinone 2003; Lavín *et al.*, 2013), estos movimientos varían en intensidad dependiendo de la dirección y velocidad de los remolinos; cuando la dirección del remolino es ciclónica se produce divergencia de agua en el centro del remolino (abordaje) y convergencia (hundimiento) en los bordes; sí la dirección del remolino es anticiclónica se produce el efecto contrario.

Esta dinámica modifica los patrones de distribución superficial de nutrientes y por lo tanto del fitoplancton, los cuales pueden observarse en imágenes de satélite de concentración superficial de  $Cl-a$  (Lavín *et al.*, 2013). En la BGC se ha observado la actividad de remolinos oceánicos que modifican la productividad del fitoplancton y consecuentemente la del zooplancton (Färber–Lorda

*et al.*, 2010; Lavín *et al.*, 2013). El hecho de que los remolinos oceánicos modifiquen variables como temperatura y productividad primaria hace de ellos un factor importante a considerar como agente de cambio en las asociaciones de FP, así como de sus patrones de distribución tanto en la superficie del océano como en los sedimentos del fondo marino.

Los patrones de circulación atmosférica, precipitación (Amador *et al.*, 2006), circulación oceánica, (Fiedler y Talley, 2006), TSM (Lavín *et al.*, 2003; Wang y Fiedler, 2006) y productividad primaria superficial del GC (Pennington *et al.*, 2006; Álvarez – Borrego, 2010) son alterados interanualmente por la incidencia de ENOS en sus fases positiva y negativa. En las fases cálidas de ENOS (El Niño) el efecto fertilizador de las surgencias queda limitado debido al aumento anómalo de la TSM y al hundimiento de la termoclina que restringe la disponibilidad de nutrientes en superficie, lo que resulta en periodos de menor productividad primaria superficial (Thunell, 1998; Pennington *et al.*, 2006; Álvarez–Borrego, 2010), mientras que, durante las fases frías de ENOS (La Niña) las anomalías de TSM son negativas (Lavín *et al.*, 2003) y la productividad primaria superficial es mayor (Pennington *et al.*, 2006).

Los cambios estacionales e interanuales en las condiciones hidrográficas y climáticas del GC son susceptibles a quedar registrados a través de sus componentes biológicos y geoquímicos en los sedimentos del fondo marino (Thunell, 1998). En algunas cuencas a profundidades intermedias la concentración de oxígeno en algunos lugares del golfo es menor a 0.5 ml/l (Hendrickx y Serrano, 2010), lo que genera una zona de oxígeno mínimo (ZOM) variable en espesor y profundidad (Álvarez–Borrego, 2010; Hendrickx y Serrano, 2010). Cuando la ZOM intercepta el talud se promueve la formación de sedimentos laminados, sin perturbación, que proveen un importante registro paleocenográfico. La interpretación de este registro puede hacerse a partir de las poblaciones de FP y de la composición geoquímica del sedimento, las cuales responden a variaciones climáticas y oceánicas de la región (Thunell, 1998; Wejnert *et al.*, 2010).

## Bibliografía

- Álvarez-Borrego, S., 2010. Physical, chemical and biological oceanography of the Gulf of California, in: Brusca, R. (Ed.), *The Gulf of California: Biodiversity and Conservation*. The University of Arizona Press and ASDM, pp. 24-48.
- Amador, J.A., Alfaro, E.J., Lizano, O.G., Magaña, V.O., 2006. Atmospheric forcing of the eastern tropical Pacific: A review. *Prog. Oceanogr.* 69, 101–142. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.pocean.2006.03.007>
- Bé, A. W. H., Tolderlund, D.S., 1971. Distribution and ecology of planktonic foraminiferal in surface waters of the Atlantic Indian Oceans, in: Funnell, B. and Riedel, W. (Ed.), *The Micropaleontology of Oceans*. Cambridge University Press, London, pp. 105–150.
- Black, D.E., Thunell R.C., Tappa, E.J., 2001. Planktonic foraminiferal response to the 1997-1998 El Niño: A sediment-trap record from the Santa Barbara Basin. *Geology* 29, 1075–1078. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2001\)029<1075:PFRTTE>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2001)029<1075:PFRTTE>2.0.CO;2)
- Blanchet, C., Thouveny, N., Vidal, L., Leduc, G., Tachikawa, K., Bard, E., Beaufort, L. 2007. Terrigenous input response to glacial/interglacial climatic variations over southern Baja California: A rock magnetic approach. *Quaternary Science Reviews.* 26. 3118–3133. [10.1016/j.quascirev.2007.07.008](https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2007.07.008).
- Collins, L.E., Berelson, W., Hammond, D.E., Knapp, A., Schwartz, R., Capone, D., 2011. Particle fluxes in San Pedro Basin, California: A four-year record of sedimentation and physical forcing. *Deep. Res. Part I Oceanogr. Res. Pap.* 58, 898–914. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2011.06.008>
- Davis, C. V., Fuqua, L., Pride, C., Thunell, R., 2019. Seasonal and interannual changes in planktic foraminiferal fluxes and species composition in Guaymas Basin, Gulf of California. *Mar. Micropaleontol.* 149, 75–88. <https://doi.org/10.1016/j.marmicro.2019.05.001>
- Emilsson, I., Alatorre, M.A., 1997. Evidencias de un remolino ciclónico de mesoescala en la parte sur del Golfo de California., in: Lavín, M.F. (Ed.), *Contribuciones a La Oceanografía Física En México*. Monografía No. 3. Unión Geofísica Mexicana, pp. 173–182. (in Spanish)

- Färber-Lorda, J., Trasviña, A., Cortés-Verdín, P., 2010. Summer distribution of euphausiids in the entrance of the Sea of Cortés in relation to hydrography. *Deep. Res. Part II Top. Stud. Oceanogr.* 57, 631–641. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2009.10.012>
- Fiedler, P.C., Talley, L.D., 2006. Hydrography of the eastern tropical Pacific: A review. *Prog. Oceanogr.* 69, 143–180. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2006.03.008>
- Gibson, K.A., Thunell, R.C., Machain-Castillo, M.L., Fehrenbacher, J., Spero, H.J., Wejnert, K., Nava-Fernández, X., Tappa, E.J., 2016. Evaluating controls on planktonic foraminiferal geochemistry in the Eastern Tropical North Pacific. *Earth Planet. Sci. Lett.* 452, 90–103. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2016.07.039>
- Hendrickx, M., Serrano, E.D., 2010. Impacto de la zona de mínimo de oxígeno sobre los corredores pesqueros en el pacífico mexicano. *Interciencia* 3, 12–18. (in Spanish)
- Kessler, W. S., 2006. The circulation of the eastern tropical Pacific: A review. *Progress in Oceanography*, V. 69, p. 181-217.
- Kincaid, E., Thunell, R.C., Le, J., Lange, C.B., Weinheimer, A.L., Reid, F.M.H., 2000. Planktonic foraminiferal fluxes in the Santa Barbara Basin: Response to seasonal and interannual hydrographic changes. *Deep. Res. Part II Top. Stud. Oceanogr.* 47, 1157–1176. [https://doi.org/10.1016/S0967-0645\(99\)00140-X](https://doi.org/10.1016/S0967-0645(99)00140-X)
- Lavín, M.F., Beier, E., Badan, A., 1997. Estructura hidrográfica y circulación del Golfo de California: Escalas estacional e interanual., in: Lavín M. F. (Ed.), *Contribuciones a La Oceanografía Física En México*, Monografía No. 3. Unión Geofísica Mexicana, pp. 141–171.
- Lavín, M.F., Palacios-Hernández, E., Cabrera, C., 2003. Sea surface temperature anomalies in the Gulf of California. *Geofis. Int.* 42, 363–375.
- Lavín, M.F., Castro, R., Beier, E., Godínez, V.M., 2013. Mesoscale eddies in the southern Gulf of California during summer: Characteristics and interaction with the wind stress. *J. Geophys. Res. Ocean.* 118, 1367–1381. <https://doi.org/10.1002/jgrc.20132>

- Lavín, M.F., Marinone, S.G., 2003. An Overview of the Physical Oceanography of. Nonlinear Process. Geophys. Fluid Dyn. 173–204.
- Machain-Castillo, M.L., Monreal-Gómez, M.A., Arellano-Torres, E., Merino-Ibarra, M., González-Chávez, G., 2008. Recent planktonic foraminiferal distribution patterns and their relation to hydrographic conditions of the Gulf of Tehuantepec, Mexican Pacific. Mar. Micropaleontol. 66, 103–119. <https://doi.org/10.1016/j.marmicro.2007.08.003>
- Nava Nava-Fernández, X.A., 2013. Respuesta de los foraminíferos planctónicos a las variaciones oceánicas del periodo 2006 – 2009 en el Noroeste del Golfo de Tehuantepec. Tesis Maest. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Penning Pennington, J.T., Mahoney, K.L., Kuwahara, V.S., Kolber, D.D., Calienes, R., Chavez, F.P., 2006. Primary production in the eastern tropical Pacific: A review. Prog. Oceanogr. 69, 285–317. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2006.03.012>
- Perez-Cruz, L. 2013. Hydrological changes and paleoproductivity in the Gulf of California during middle and late Holocene and their relationship with ITCZ and North American Monsoon variability. Quaternary Research. 79. 138–151. [10.1016/j.yqres.2012.11.007](https://doi.org/10.1016/j.yqres.2012.11.007).
- Portela, E., Beier, E., Barton, E.D., Castro, R., Godínez, V., Palacios-Hernández, E., Fiedler, P.C., Sánchez-Velasco, L., Trasviña, A., 2016. Water masses and circulation in the tropical Pacific off central Mexico and surrounding areas. J. Phys. Oceanogr. 46, 3069–3081. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-16-0068.1>
- Ravelo A. C., Hillarie – Marcel C., 2007. The Use of Oxygen and Carbon Isotopes of Foraminifera in Paleooceanography, En: Hillarie – Marcel C., de Vernal, A. (Eds.), *Proxies in Late Cenozoic Paleooceanography*. Elsevier, Amsterdam. V. 1, Cap. 18, p. 735-764.
- R Reynolds S. L., Sancetta C., 1992. Seasonal associations of phytoplankton and planktic foraminifera in an upwelling region and their contribution to the seafloor. *Marine Micropaleontology*. V 18, p. 263-278.

- Tedesco, K.A., Thunell, R.C., 2003. Seasonal and interannual variations in planktonic foraminiferal flux and assemblage composition in the Cariaco Basin, Venezuela. *J. Foraminifer. Res.* 33, 192–210. <https://doi.org/10.2113/33.3.192>
- Thunell, R.C., Reynolds, L.A., 1984. Sedimentation of Planktonic Foraminiferal: Seasonal Changes in Species Flux in the Panama Basin. *Micropaleontology* 30, 243. <https://doi.org/10.2307/1485688>
- Thunell, R. C., 1998a. Seasonal and annual variability in particle fluxes in the Gulf of California: A response to climate forcing. *Deep. Res. Part I Oceanogr. Res. Pap.* 45, 2059–2083. [https://doi.org/10.1016/S0967-0637\(98\)00053-3](https://doi.org/10.1016/S0967-0637(98)00053-3)
- Thunell, R.C., 1998b. Particle fluxes in a coastal upwelling zone: Sediment trap results from Santa Barbara Basin, California. *Deep. Res. Part II Top. Stud. Oceanogr.* 45, 1863–1884. [https://doi.org/10.1016/S0967-0645\(98\)80020-9](https://doi.org/10.1016/S0967-0645(98)80020-9)
- Velázquez-Aguilar M. 2019. Registro de precipitación en la región del Océano Pacífico tropical oriental (cuenca Alfonso, Golfo de California) durante los últimos 18,000 años: una aproximación a través de indicadores geoquímicos. Tesis de maestría UNAM. 88 pp.
- Wejnert, K.E., Pride, C.J., Thunell, R.C., 2010. The oxygen isotope composition of planktonic foraminiferal from the Guaymas Basin, Gulf of California: Seasonal, annual, and interspecies variability. *Mar. Micropaleontol.* 74, 29–37. <https://doi.org/10.1016/j.marmicro.2009.11.002>

## Capítulo 3

**Planktonic foraminiferal assemblages and particle fluxes at the entrance of the Gulf of California highlight the effects of the strong El Niño 2015 – 2016**

**Nava-Fernández, X. A., Machain-Castillo, M. L., Sifeddine, A., Mendez-Millan, M., Caquineau, S., Gibson, K., Tappa, E., Ruiz-Fernández, A. C., Sanchez-Cabeza, J. A., Rodríguez-Ramírez, A., Lara-Cera, A.** (Publicado en *Progress in Oceanography*. 208 102880).

En este capítulo se resuelven los siguientes objetivos:

- a) Identificar las asociaciones de FP en trampas de sedimento de 2015 a 2019.
- b) Analizar la variación de la velocidad del viento, TSM, Cl-a y el MEI durante el periodo de muestreo, mediante series de tiempo de dichos parámetros.
- c) Reconocer variaciones en la productividad mediante análisis geoquímicos de masa total, Carbono orgánico, Nitrógeno total y carbonatos.

Con esta información se escribió un artículo científico que fue publicado en la revista *Progress in Oceanography*, en un número especial sobre Resiliencia del Golfo de California.



Contents lists available at ScienceDirect

Progress in Oceanography

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/pocean](http://www.elsevier.com/locate/pocean)

## Planktonic foraminiferal assemblages and particle fluxes at the entrance of the Gulf of California highlight the effects of the strong El Niño 2015–2016

Xinantecatl Antonio Nava-Fernández<sup>a</sup>, María Luisa Machain-Castillo<sup>b,\*</sup>, Abdelfettah Sifeddine<sup>c</sup>, Mercedes Mendez-Millan<sup>d</sup>, Sandrine Caquineau<sup>d</sup>, Kelly A. Gibson<sup>e</sup>, Eric Tappa<sup>f</sup>, Ana Carolina Ruiz-Fernández<sup>g</sup>, Joan-Albert Sanchez-Cabeza<sup>g</sup>, Alejandro Rodríguez-Ramírez<sup>b</sup>, Andrea Rebeca Lara-Cera<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México, Av. Ciudad Universitaria 3000, 04510 Coyoacán, Ciudad de México, Mexico

<sup>b</sup> Unidad de Procesos Oceánicos y Costeros, Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria 04510, Mexico

<sup>c</sup> Institut de Recherche pour le Développement (IRD), Ciudad Universitaria, 04510, Mexico

<sup>d</sup> IRD, Sorbonne Université, CNRS, MNHN, IPSL, LOCEAN: Laboratoire d'Océanographie et du Climat: Expérimentations et approches Numériques, Bondy, France

<sup>e</sup> University of South Carolina Aiken, Aiken, SC 29801, USA

<sup>f</sup> School of the Earth Ocean and Environment, University of South Carolina, Columbia 29208, USA

<sup>g</sup> Unidad Académica Mazatlán, Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México, Calz. Montes Camarena s/n, Col. Playa Sur 82040, Mazatlán, Mexico

### ARTICLE INFO

#### Keywords:

Particle fluxes  
Sediment trap  
Upwelling  
Eastern Tropical Pacific  
ENSO  
Seasonal cycles  
Primary productivity

### ABSTRACT

The impacts of El Niño 2015–2016 on planktonic foraminiferal assemblages and particle fluxes (total mass, organic carbon, total nitrogen, and carbonate) were analyzed in a sediment trap record located at the entrance of the Gulf of California from 2015 to 2019. Biweekly data of the sea surface temperature (SST) and sea surface chlorophyll-*a* (Chl-*a*) were obtained from satellite images (MODIS-AQUA) during this period. Particle fluxes and planktonic foraminiferal assemblages reflected the seasonal cycles of SST and phytoplankton biomass highlighting the effects of El Niño 2015–2016. During neutral and La Niña conditions, winter-spring upwelling leads to low SST, high Chl-*a* and particle fluxes, and an assemblage dominated by *Globigerina bulloides* while the summers are characterized by high SST, low Chl-*a* and particle fluxes, and a *Globorotaloides hexagonus* assemblage. In contrast, in normal summers, there is an alternation of *G. bulloides* and *Orbulina universa-Trilobatus sacculifer-Globigerinella siphonifera* associations. By late autumn under La Niña conditions, the *Globigerinita glutinata* assemblage reflects the transition from warm to cold conditions and the beginning of the upwelling season. This general pattern was affected by El Niño during 2015–2016. From late summer 2015 to early winter 2016 (El Niño 2015–2016 maximum intensity), *Globigerinoides tenellus* dominated, reflecting the intrusion of warm and oligotrophic equatorial waters. These results show the strong influence of El Niño Southern Oscillation (ENSO) on oceanic dynamics and planktonic foraminiferal assemblages at the entrance of the Gulf of California, and allow for a better interpretation of the preservation of these anomalous warm events in the sedimentary record, which can provide a better understanding of the long-term variations and effects of ENSO.

### 1. Introduction

The El Niño Southern Oscillation (ENSO) influences the interannual variability of the sea surface temperature (SST), primary productivity, and thermocline depth in the eastern tropical Pacific (ETP) (Lavín and Marinone 2003; Fiedler and Talley 2006). It affects climate on a global scale through atmospheric and oceanic teleconnections and influences

economic and social sectors (Amador et al. 2006). During extreme events such as El Niño 1982–1983 and 1997–1998, the positive SST anomalies reached values of up to 2 °C in the ETP (Climate Prediction Center 2022), causing drastic decreases in primary productivity in the Gulf of California (Thunell 1998a; Álvarez-Borrego 2012). This resulted in the collapse of important fisheries in the southern Gulf of California, such as the collapse of squid catches during El Niño 1982–1983 (Lluch-

\* Corresponding author.

E-mail address: [machain@cmarl.unam.mx](mailto:machain@cmarl.unam.mx) (M. Luisa Machain-Castillo).

<https://doi.org/10.1016/j.pocean.2022.102880>

Received 4 October 2021; Received in revised form 3 July 2022; Accepted 30 August 2022

Available online 21 September 2022

0079-6611/© 2022 Elsevier Ltd. All rights reserved.

Cota et al. 2007).

The strong El Niño 2015–2016 event presented SST positive anomalies  $> 2.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Climate Prediction Center 2022) and triggered severe changes in larval fish abundance, phytoplankton biomass, and phytoplankton production in the Gulf of California (Sánchez-Velasco et al. 2017; Coria-Monter et al. 2018; Ortiz-Ahumada et al. 2018). The Gulf of California is located in the northern ETP, and the entrance to the Gulf of California is the limit between tropical and subtropical surface water masses, varying seasonally (Portela et al. 2016) (Fig. 1). Therefore, this is a strategic region for evaluating the latitudinal influence of ENSO events and their effects on the distribution of water masses and phytoplankton biomass.

Zooplanktonic foraminifera includes primary and secondary consumers (Spindler et al. 1984; Hemleben et al. 1989), and changes in primary productivity can modify their community structures (Kincaid et al. 2000; Tedesco and Thunell 2003; Davis et al. 2019). The response of planktonic foraminifera to ENSO in the ETP and other regions includes modifications in their distribution, abundance, and diversity patterns, as well as in their geochemical and isotopic composition due to seasonal and interannual changes in the surface and subsurface water masses they inhabit (Black et al. 2001; Tedesco and Thunell 2003; Machain-Castillo et al. 2008; Wejnert et al. 2010; Gibson et al. 2016). Changes in phytoplankton biomass can be evaluated by quantifying

photosynthetic pigments, and changes in primary production can be indirectly reflected by geochemical proxies, such as total mass, organic carbon, total nitrogen, and carbonate fluxes (mass of these variables  $\text{m}^{-2}\text{ day}^{-1}$ ), which are commonly used in paleoproductivity reconstructions (Ganeshram and Pedersen 1998; Thunell 1998 a, b; Muller-Karger et al. 2004; Thunell et al. 2007; Ontiveros-Cuadras et al. 2019).

Analyzing zooplanktonic foraminiferal populations and particle fluxes in sediment trap samples helps understand the ENSO and its effects. The parameters analyzed in the samples can be compared and calibrated with environmental factors (Kincaid et al. 2000; Tedesco and Thunell 2003; Muller-Karger et al. 2004), which may provide a comprehensive perspective of the components of the system.

Studies in the Gulf of California have analyzed the diversity and spatial distribution of planktonic foraminiferal species. Overall, previous studies from surface sediment samples (Bandy 1961; Rozo-Vera and Carreño 1988) and plankton tows (Parker 1973; Brinton et al. 1986), have suggested that planktonic foraminiferal species are distributed according to the thermal regime of the gulf water masses and the influence of mesoscale processes such as upwelling and oceanic fronts (Bandy 1961; Parker 1973; Brinton et al. 1986; Rozo-Vera and Carreño 1988). In terms of species diversity, 23 species have been reported in the gulf (Bandy 1961), with lower species diversity reported in the northern part of the gulf than in the southern part (Parker 1973; Brinton et al.

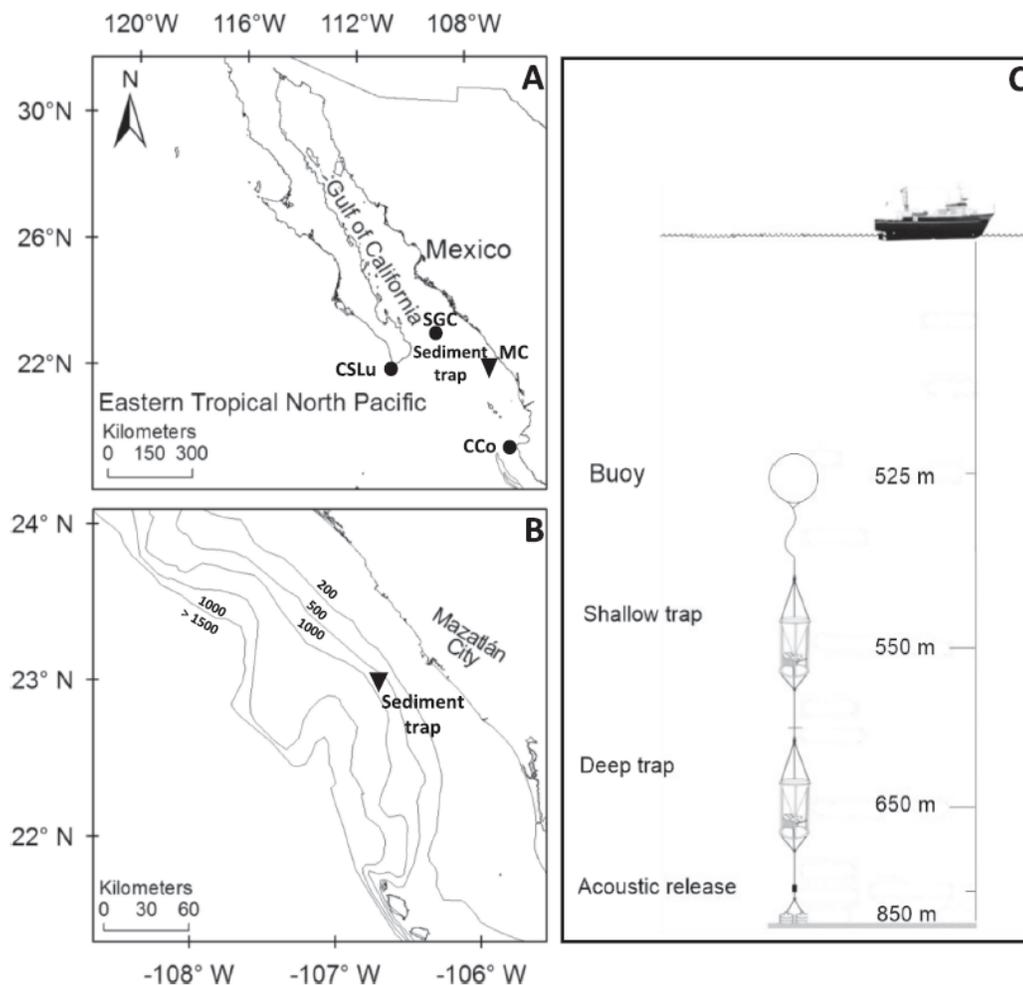


Fig. 1. A) Study area, triangle: sediment trap location, Mazatlán City (MC), Southern Gulf California (SGC), Cabo San Lucas (CSLu), and Cabo Corrientes (CCo), B) study area bathymetry, C) vertical arrangement of the sediment traps.

1986). Although these studies refer to the ecological affinity of the species, they were based on a single sample collection and do not provide information on the seasonal and interannual variability of their populations.

With respect to sediment trap studies, Thunell et al. (1996) analyzed the ecological succession of plankton groups, including foraminifera, and the relationships between plankton production and hydrographic conditions from July 1990 to August 1992 in the Carmen and Guaymas Basins. They found high planktonic foraminiferal fluxes associated with the winter-spring upwelling. Thunell (1998a) reported higher particle fluxes (total mass, organic carbon, carbonate, and biogenic opal fluxes) during the cold upwelling winter season and lower fluxes during summer. Furthermore, they found a reduction in organic carbon and biogenic opal fluxes, suggesting lower primary productivity during El Niño 1991–1992, using a sediment trap record from 1990 to 1996 in the Guaymas Basin. In the same record, Thunell et al. (1999) and Wejnert et al. (2010) analyzed the isotopic composition ( $\delta^{18}\text{O}$ ) of planktonic foraminifera related to the SST seasonal and interannual variability and the warming associated with El Niño conditions. In addition, using the same samples, Davis et al. (2019) analyzed the seasonal and interannual changes in planktonic foraminiferal species and their relationship with the hydrographic regime. They reported the following three assemblages: i) *Globigerina bulloides* and *Neogloboquadrina dutertrei* during the cold upwelling winter-spring season; ii) *Globigerinoides ruber*, *Globoturbotalia rubescens*, *Globigerinoides conglobatus*, and *Trilobatus sacculifer* during the warm and oligotrophic summer season; and iii) *Pulleniatina obliquiloculata* and *Globigerinita glutinata* during the transitional autumn season. However, during El Niño 1991–1992 conditions, the almost exclusive presence of *Globoturbotalia menardii* suggests the dominance of warm and oligotrophic tropical waters.

Considering the effects of strong El Niño events on the southern Gulf of California (Sánchez-Velasco et al. 2017; Coria-Monter et al. 2018) and the sensitivity of zooplanktonic foraminifera to hydrographic changes, we hypothesized that during the El Niño 2015–2016 event, the planktonic foraminiferal assemblages at the entrance of the Gulf of California would be dominated by warm-water species, which are different from those typically observed during neutral and La Niña years. The main objective of this paper was to determine the response of planktonic foraminiferal assemblages, particle fluxes (organic carbon, total nitrogen, carbonate, and total mass) to meteorological and hydrological changes recorded from 2015 to 2019, through the analysis of sediment trap samples. To our knowledge, the findings presented here constitute the first report of planktonic foraminiferal assemblages and particle fluxes in a sediment trap at the entrance of the Gulf of California.

## 2. Material and methods

### 2.1. Regional setting

The Gulf of California is a semi-enclosed sea in the northeastern Mexican Pacific. It is connected to the ETP at its southernmost portion, known as the entrance to the Gulf of California (Lavín et al. 1997; Lavín and Marinone 2003) (Fig. 1 A-C). The entrance to the Gulf of California is a boundary zone where seasonal variations occur in currents and water masses and is influenced by the latitudinal migration of the Inter-Tropical Convergence Zone (Amador et al. 2006; Fiedler and Talley 2006; Portela et al. 2016).

The entrance of the Gulf of California is characterized by the presence of transitional waters composed of Tropical Surface Water, California Current Water, and Gulf of California Water in the surface layer, whose relative importance varies seasonally. During the boreal winter (January–March), there is a mixture of similar proportions of Tropical Surface Water, California Current Water, and Gulf of California Water. However, there is a lower presence of Tropical Surface Water on the southeast side. During the boreal spring (April–June), Gulf of California Water reaches the entrance of the gulf, and the presence of California

Current Water is augmented between 30 m and 150 m (Portela et al. 2016). The local winds during winter and spring blow from the northwest, parallel to the Gulf of California longitudinal axis, and produce upwelling along the Gulf of California oriental coast (Lavín and Marinone, 2003). Wind forced upwelling decreases SST and increases the input of nutrients with Subtropical Subsurface Water, which enhances primary productivity, with mean values from 1.16 to 1.91 g C m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup> for the whole gulf (Hidalgo-González and Álvarez-Borrego, 2004; Álvarez-Borrego 2012), which is reflected by high Chl-*a* concentrations in satellite images (López-Sandoval et al. 2009; Álvarez-Borrego, 2010; 2012). Offshore Mazatlán, the winds parallel to the coastline during winter and spring produce coastal upwelling, indicated by high values of the coastal upwelling index (m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> 100 m<sup>-1</sup> of coastline) that produce an SST gradient from the coast to 110 km offshore, which is more intense in the first 50 km (Herrera-Becerril et al. 2021; Herrera-Becerril 2020).

During the boreal summer (July–September) and autumn (October–December), the Inter-Tropical Convergence Zone is in its northernmost position. The California Current is restricted to northern latitudes, promoting the northward flux of the Mexican Coastal Current, which transports equatorial warm water (Tropical Surface Water) into the entrance of the Gulf of California (Amador et al. 2006; Fiedler and Talley 2006; Portela et al. 2016). Further, a monsoon circulation system is established from summer to autumn (rainy season). No upwelling occurs along the Gulf of California oriental coast (Amador et al. 2006), where SST is typically > 28 °C, and the water column is stratified (Lavín et al. 1997; Lavín and Marinone 2003), and primary productivity is low, with mean values from 0.39 to 0.49 g C m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup> for the whole gulf (Hidalgo-González and Álvarez-Borrego, 2004; Álvarez-Borrego 2012).

In addition to upwelling, other mesoscale processes, such as eddies and fronts at the entrance of the Gulf of California, promote changes in the SST distribution, water column vertical structure (Emilsson and Alatorre 1997; Lavín and Marinone 2003; Lavín et al. 2013), nutrient availability, and consequently, phytoplanktonic and zooplankton abundance (Färber-Lorda et al. 2010; Coria-Monter et al. 2014; Durán-Campos et al. 2015). All these factors influence planktonic foraminiferal abundance, distribution patterns, and taxonomic composition. Machain-Castillo et al. (2008) reported how upwelling and ocean dynamics are generally reflected in the sedimentary record of planktonic foraminifera in the Gulf of Tehuantepec. Therefore, the planktonic foraminiferal assemblages collected in sediment traps installed at mid-water depths (as in this study) can reflect changes in the surface and subsurface water masses because they live in the surface and subsurface waters above the trap and are associated with each water mass; therefore, when the spatial distribution of these water masses in the sediment trap location changes, this change is reflected by the sinking planktonic foraminiferal assemblages collected in the trap.

During El Niño conditions, the entrance of the Gulf of California shows SST positive anomalies (1 to 3 °C) and mean sea-level rises (up to 30 cm). The thermocline deepens from 50 to 100 m due to the advection of Kelvin and trapped coastal waves (Lavín and Marinone 2003), which promote a greater presence of warm and oligotrophic equatorial waters (Lavín et al. 1997; Lavín and Marinone 2003). These conditions weaken coastal upwelling fertilization because nutrient input to the euphotic zone is restricted, and primary surface productivity decreases. During La Niña, hydrological and productivity conditions are opposite (Lavín and Marinone, 2003; Pennington et al. 2006; Álvarez-Borrego 2012).

An important feature of the Gulf of California is that seasonal and interannual variability can be recorded in the sediments of some basins, such as the Mazatlán coast, where a persistent oxygen minimum zone occurs at intermediate water depths because of poor ventilation and high surface productivity (Serrano, 2012; Ontiveros-Cuadras et al., 2019; Herrera-Becerril et al., 2021). Therefore, non-disturbed sediments are present (Ganeshram and Pedersen 1998; Thunell 1998a; Hendrickx and Serrano 2010), and calibration studies of planktonic foraminifera and particle fluxes can contribute to improving the interpretation of ENSO variability in the sedimentary record at the entrance of the Gulf of

California.

## 2.2. Sediment trap

A mooring with two sediment traps (McLANE, PARAFLEX Mark 78H-21) was deployed at 23° 01' 54" N and 106° 44' 18" within the area of influence of upwelling, at the entrance of the Gulf of California, to 20 nautical miles offshore Mazatlán, México (Fig. 1 B) on board the R/V "El Puma" of the Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) (Fig. 1 C). Two traps were placed 200 m from the seafloor to avoid contamination from sediment: one at 550 m (to catch shallow and mid-water planktonic foraminifera) and the other at 650 m (Fig. 1 C). The deepest trap provided replicate samples in case there was a sampling problem with the upper one. Previous studies (Nava-Fernández, 2013) showed that in such an arrangement, foraminiferal assemblages were similar in both traps. The samples were collected biweekly from May 2015 to February 2019. Due to ship-time unavailability, there were three sampling gaps, from mid-February to the end of March 2016, February and March 2017, and March to mid-April 2018. Due to missing samples, there were two gaps, from June 30 to July 14 and August 14 to 28, 2017.

In this study, only the data from the 550 m sediment trap were reported because of the 82 samples analyzed, 80 samples contained at least 100 planktonic foraminifera; therefore, these samples had satisfactory statistical reliability (Fátela and Taborada 2002). The two samples (from July 30, 2016 to August 13, 2019 and from August 14, 2016) with <100 individuals, i.e., very low number of individuals, even considering the replicate samples from the 650 m sediment trap; therefore, these samples were not considered, and the results included only the 550 m sediment trap samples to avoid any bias resulting from using samples from both traps.

Sodium azide (10 g/L) was placed in each trap cup before deployment (to control microbial growth and prevent oxidation of organic matter) and buffered with sodium borate (0.5 g/L) to maintain pH in the range 8.0–8.5, tested after collection. From the 82 samples collected, five equal aliquots of each sample (500 mL) were obtained with a McLane rotatory splitter (SWD-10) and were used to perform biological and geochemical analyses.

## 2.3. Meteorological and hydrographic information

Wind speed data were obtained from the Mazatlán Atmospheric Observatory (RUOA-UNAM, <https://www.ruoa.unam.mx>), located 20 nautical miles from the sediment trap. The daily and biweekly averages were calculated and plotted. Daily wind speed averages were used to calculate the Ekman layer depth, which is an indicator of the depth at which the wind influences the water column (Pond and Pickard, 1983); Ekman layer depth and thermocline depth allow to estimate whether coastal upwelling carries surface or subsurface water masses, based on the thermal limits of the surface and subsurface water masses proposed by Portela et al. (2016) and its position in the water column, which is indicated by CTD profiles. The position of the thermocline with respect to the Ekman layer depth is important to our study because water from below the thermocline is nutrient rich, promotes increased phytoplankton biomass, and likely contains a different foraminiferal assemblage than non-upwelled water mass.

$$D_E = 4.3 \frac{W_{10}}{\sin^{1/2}(\phi)} \quad (1)$$

where  $D_E$  = Ekman layer depth (m), 4.3 = drag constant,  $W_{10}$  = wind speed at 10 m (m/s), and  $\phi$  = latitude (°).

Taken from Pond and Pickard (1983).

CTD profiles were obtained during the four trap deployment-recovery cruises to generate the temperature profiles and T/S diagrams. Level 3 daily satellite images of SST and Chl- $\alpha$  (MODIS-AQUA),

with a spatial resolution of 4 km<sup>2</sup>, were obtained. SST and Chl- $\alpha$  daily values were extracted using the software package SeaDAS (version 7.5.3) at the Unidad de Informática Marina (UNIMAR, ICMYL-UNAM) to obtain biweekly averages. Multivariate ENSO Index version 2 (MEI v.2) (The Physical Sciences Laboratory 2022) was used to indicate the ENSO phase and intensity. This index was preferred over ONI 3.4 (Climate Prediction Center 2022) because it covers a large region and should reflect the conditions in the study area with a shorter time lag (values of MEI v.2 > 1 during several months, indicating the development of an El Niño event with certainty). Pearson correlation analysis (at 95 % confidence) was performed for all environmental and ecological analyzed variables (MEI v.2, wind speed, Ekman layer depth, SST, Chl- $\alpha$ , total mass, organic carbon, total nitrogen, carbonate, planktonic foraminifera flux, and factor loadings of planktonic foraminiferal assemblages) using STATISTICA software version 10 to depict the relationship between them (StatSoft Inc., 2011). Meteorological and hydrographic data were continuous, whereas the sediment trap data had temporal gaps due to ship unavailability (Fig. 2). One-way ANOVA was performed to identify significant differences among seasons for the variables of Ekman layer depth, SST, Chl- $\alpha$ , and total mass (Fig. S1) using StatSoft Inc. (2011).

## 2.4. Planktonic foraminifera

One aliquot (or two aliquots for samples with < 100 individuals) from each original sample was used for foraminiferal population analyses. The samples were filtered through a 150  $\mu$ m mesh, and all planktonic foraminifera were extracted with a brush from wet samples under a stereoscopic microscope. The planktonic foraminiferal flux (individuals m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>) was calculated as the quotient of the number of individuals and the product of the sampling area of the sediment trap and the biweekly collection period between successive samples. All specimens were taxonomically identified to the species level, according to the taxonomic descriptions provided by Kennett and Srinivasan (1983). The individuals were counted, and a relative abundance matrix was built with 82 columns (samples) and 21 rows (species). Q-mode factor analysis (StatSoft Inc., 2011) was performed on a reduced matrix (19 rows and 79 columns) to define foraminiferal assemblages and their temporal distribution. This matrix only included species present in more than three samples, with at least 1 % of the total population (to avoid bias by rare or sporadic species) and samples (columns), statistically representative (Fátela and Taborada 2002) with over 100 individuals. Species indicator analysis (Dufrene and Legendre, 1997) was performed on the relative abundance of the species (RStudio, library indicspecies) to support the presence of indicator species.

## 2.5. Particle fluxes

Particle fluxes were calculated from another aliquot of each sediment trap sample. Samples were rinsed, dried in an oven at 40 °C, and weighed using a micro-analytical balance (Sartorius MC5, accuracy = 0.001 mg). For organic carbon analysis, an aliquot (0.5–1 g) was ground in an agate mortar and acidified with HCl 10 % until all carbonates were removed. Total nitrogen concentrations were determined in the bulk ground samples without eliminating carbonates. Organic carbon and total nitrogen content were determined using an elemental analyzer (Flash HT 2000 Thermo Scientific). Calibration was performed using certified reference materials (CRM, EMPA2, IVA Analyze Technik). The analytical accuracy was verified using an organic analytical standard (OAS) with a high organic content from elemental microanalysis. Analytical precision was < 3.5 % for organic carbon and < 2 % for total nitrogen. The total mass (dry weight of each sediment trap sample), organic carbon, total nitrogen, and carbonate concentrations were standardized to daily fluxes (g/m<sup>-2</sup>(-|-) day<sup>-1</sup>) and calculated as the quotient of the mass of these parameters, and the product of the sediment trap's sampling area and the collection period. This study used particle fluxes as an indirect indicator of primary productivity

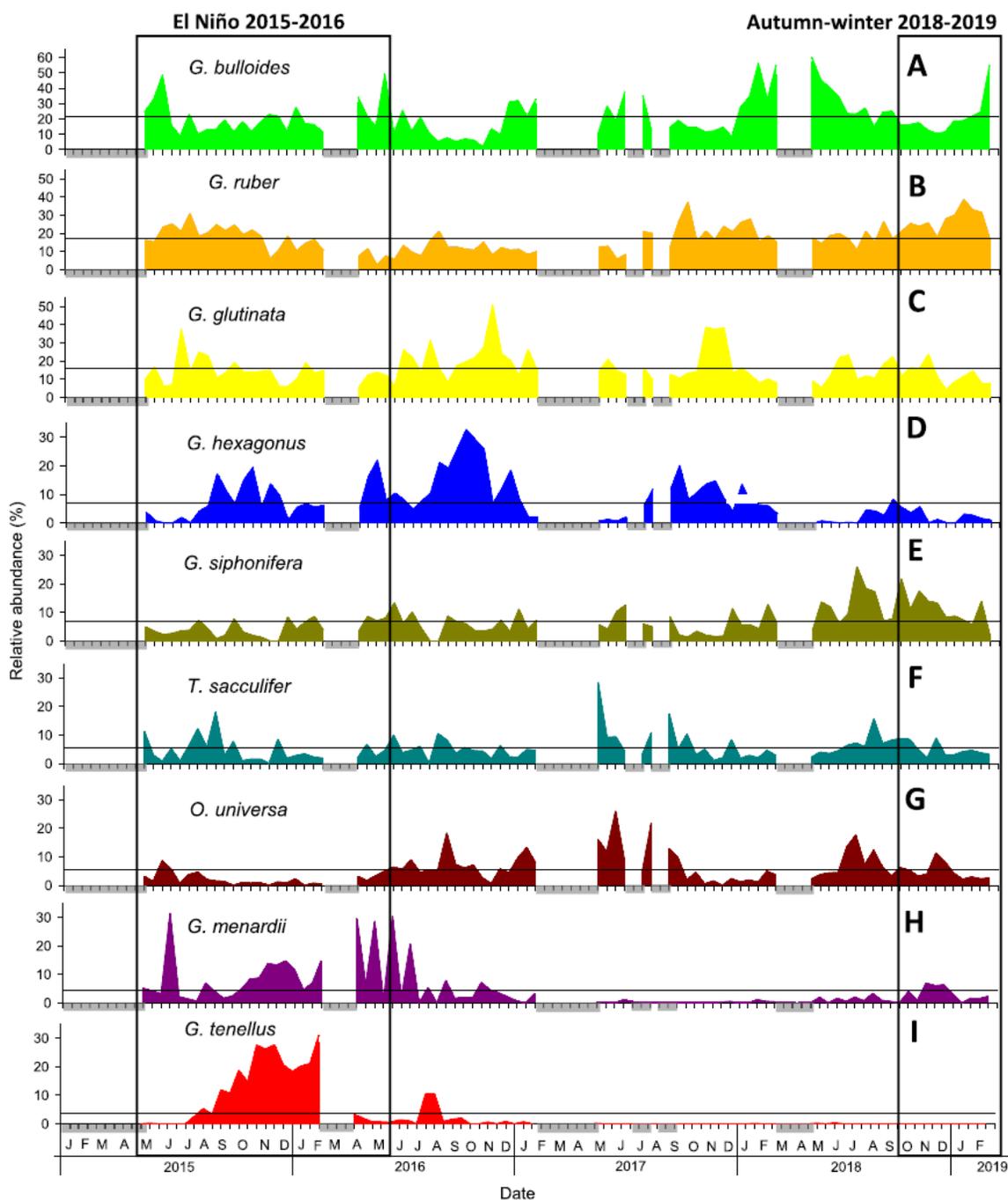


Fig. 2. A-I). Relative abundance (%) of the nine most abundant planktonic foraminiferal species collected from January 2015 to February 2019 at the entrance of the Gulf of California. Gray bars indicate no data.

variability.

### 3. Results and discussion

#### 3.1. Foraminiferal assemblages

The planktonic foraminiferal populations found in the sediment trap at the entrance of the Gulf of California from 2015 to 2019 responded to ocean-atmospheric dynamics, presenting characteristic assemblages for each scenario. Twenty-one nominal species of planktonic foraminifera

were collected during the sampling period (Table S1). Nine species (*G. bulloides* 25.4 %, *G. ruber* 16.6 %, *G. glutinata* 14.9 %, *Globorotaloides hexagonus* 7.7 %, *Globigerinella siphonifera* 6.9 %, *T. sacculifer* 5.7 %, *Orbulina universa* 5.7 %, *G. menardii* 4.4 % and *Globigerinoides tenellus* 2.4 %) accounted for 89.7 % of the total foraminiferal abundance (Table S2, Fig. 2). The Q-mode factor analysis delineated seven species assemblages that explained 95.5 % of the total variance (Table S3). One or more species characterized these planktonic foraminiferal assemblages with a factor score > 1.0 (Table S4), and their factor loadings defined temporal intervals that could be related to seasonal and

interannual changes in hydrological conditions (Table S5, Fig. 3).

3.2. Oceanographic scenarios

3.2.1. Neutral and weak La Niña conditions

3.2.1.1. Winter-spring upwelling scenario. During winter (January–March) and spring (April–June), wind-induced upwelling promoted a decrease in SST ( $r = -0.44$ ,  $p < 0.05$ ) between the Ekman layer depth and SST. The subsurface colder waters from 21.8 to 24.8 °C (Figs. 3, 4) are rich in nutrients and likely promote phytoplankton blooms ( $r = -0.37$ ,  $p < 0.05$  between SST and Chl-*a*), reflected by high Chl-*a* values (0.36–2.12 mg m<sup>-3</sup>) during 2017 and 2018 compared to the other studied years (Table S6, S7, Fig. 3). The observed fertilization effects of upwelling are in accordance with those previously reported at the

entrance (López-Sandoval et al. 2009; Ortiz-Ahumada et al. 2018) and the southern Gulf of California (Coria- Monter et al. 2018) (Table 1). The differences in upwelling temporality and effects could be related to local variations in the wind speed and hydrological regimes.

The particle fluxes and surface satellite Chl-*a* ( $p < 0.05$ ) had similar seasonal patterns, both reflecting the fertilization effects of upwelling during winter and spring and the presence of warm and oligotrophic waters of equatorial origin during summer and autumn (Figs. 3 and 5). The increases in total mass and organic carbon fluxes during the upwelling periods (Tables S6 and S7) are in accordance with the sediment trap records from the Guaymas (Thunell 1998a), Santa Barbara (Thunell 1998b), San Pedro (Thunell et al. 1994), and Cariaco basins (Muller-Karger et al. 2004) (Table 2). The magnitude and temporality are different (Table 2) because of the geographical location and hydrological regime (Thunell, et al. 1994; Thunell 1998b). The total mass values

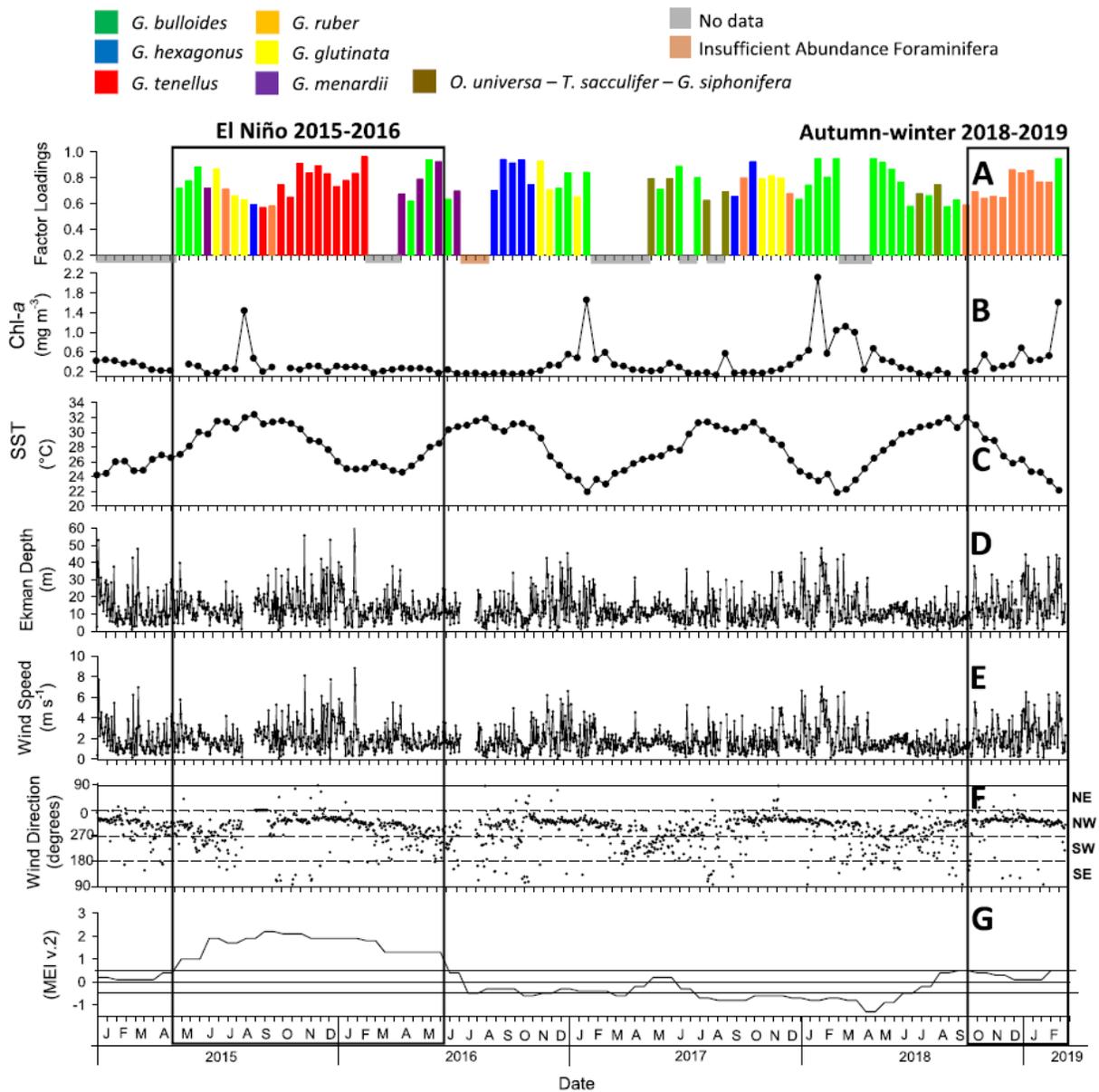


Fig. 3. A) Foraminiferal assemblages factor loadings, B) Chlorophyll-*a* concentration (Chl-*a*), C) Sea Surface Temperature (SST), D) Ekman layer depth, E) Wind Speed, F) Wind Direction, and G) Multivariate ENSO Index version 2 (MEI v.2), from January 2015 to February 2019, at the entrance of the Gulf of California.

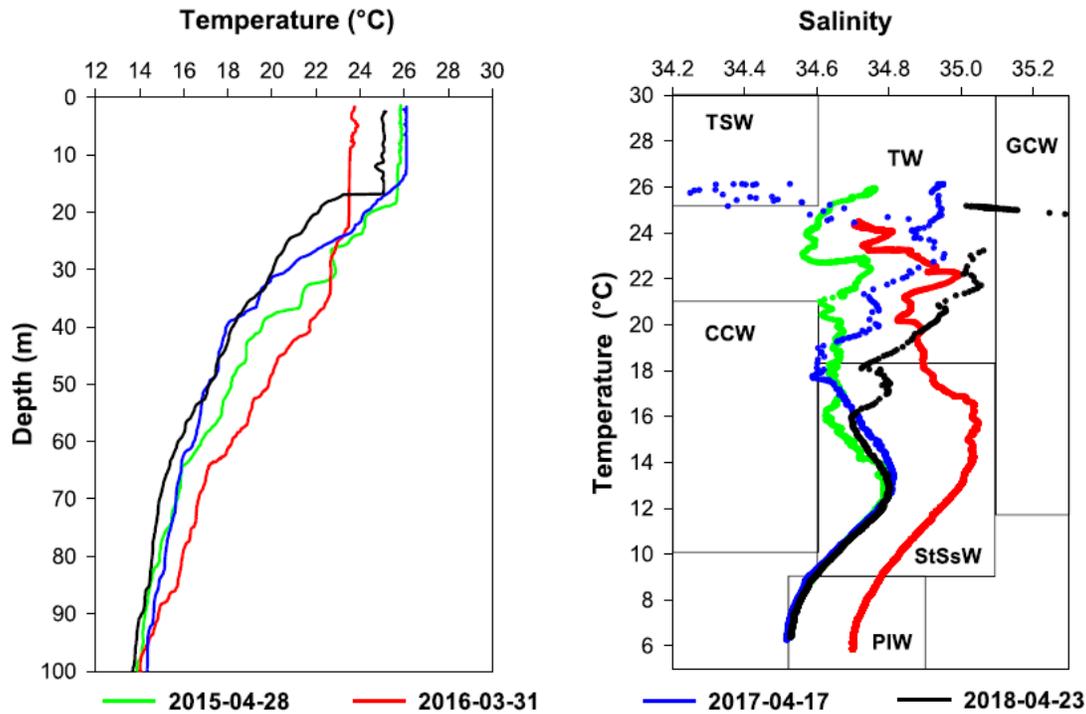


Fig. 4. Individual spring CTD data from 2015 to 2018. A) Temperature profiles, B) TS diagrams that show the presence of Transitional Waters (TW), Tropical Surface Water (TSW), Gulf of California Water (GCW), California Current Water (CCW), Subtropical Subsurface Water (StSsW), and Pacific Intermediate Water (PIW), based in the water masses classification of Portela et al. (2016).

Table 1

Comparison of average values of SST (°C) and sea surface Chl- $\alpha$  concentration (mg m<sup>-3</sup>) from the entrance of the Gulf of California (this study), Southern Gulf of California (Coria-Monter et al. 2018), Cabo San Lucas (Ortiz-Ahumada et al. 2018), and Cabo Corrientes (López-Sandoval et al. 2009).

Hydrographic regime	Variable	Entrance to the Gulf of California	Southern Gulf California	Cabo San Lucas	Cabo Corrientes
upwelling		This study			
		Winter	Winter	Spring	Spring
		January–March 2018	January 2014	April average 2003–2016	May 2002
	SST	23.2 ± 0.9	22.3	23	27.1
	Chl- $\alpha$	1.0 ± 0.5	0.8 mg	1	1.4
non-upwelling		Summer	Summer	Summer	Summer
		July–August 2018	August 2014	August average 2003–2016	June 2003
	SST	31.2 ± 0.6	31.5	28.5	29
	Chl- $\alpha$	0.18 ± 0.03	0.25	0.1	0.15

at the entrance of the Gulf of California and the Guaymas Basin (Thunell, 1998 a) were similar because both sites are within the Gulf of California and share the same wind regime (Table 2).

The planktonic foraminifera flux has a similar pattern to that of particle fluxes and Chl- $\alpha$  during neutral and weak La Niña conditions, with high values in winter and spring and low values in summer and autumn (Fig. 5). Planktonic foraminifera are primary and secondary consumers; some species feed on phytoplankton, others on zooplankton, and some on both (Spindler et al. 1984; Hemleben et al. 1989). Food availability is one factor that influences the foraminiferal abundance and assemblage composition (Hemleben et al. 1989; Thunell et al. 1996). Therefore, increases in phytoplankton biomass and particle fluxes associated with coastal upwelling could be related to increases in planktonic foraminiferal flux at the entrance of the Gulf of California, as observed in the Guaymas Basin (Thunell et al. 1996; Davis et al. 2019) and other regions influenced by upwelling (Kincaid et al. 2000; Tedesco and Thunell 2003).

Upwelling periods were characterized by an assemblage dominated by *G. bulloides* (Factor 1, 59.7 % explained variance) (Fig. 3), with factor loadings increasing as SST decreased ( $r = -0.67, p < 0.05$ ) and Chl- $\alpha$

increased ( $r = 0.40, p < 0.05$ ). The species *G. bulloides* inhabits sub-polar to tropical zones (Bé and Tolderlund 1971), and is more abundant near the surface during upwelling periods; however, it is frequently found in moderate abundance when stratification increases (Field 2004) and is particularly abundant in the California Current System (Sautter and Sancetta, 1992; Ortiz and Mix, 1992; Black et al. 2001; Field 2004). It is also considered an indicator of productive water influenced by upwelling in tropical and subtropical regions (Kincaid et al. 2000; Black et al. 2001; Tedesco and Thunell 2003; Machain-Castillo et al., 2008; Nava-Fernández 2013). In the Guaymas Basin, Davis et al. (2019) also reported that *G. bulloides* was more abundant when the coastal upwelling increased the particle fluxes during winter and spring. Therefore, the predominance of the assemblage dominated by *G. bulloides* during winter-spring 2017 and 2018 at the entrance of the Gulf of California indicates the fertilization effects of upwelling.

3.2.1.2. Summer scenario. During summer (July–September) and early autumn (October), Tropical Surface Water has a major presence at the entrance of the Gulf of California (Portela et al. 2016). The absence of upwelling and the presence of warm and oligotrophic waters were

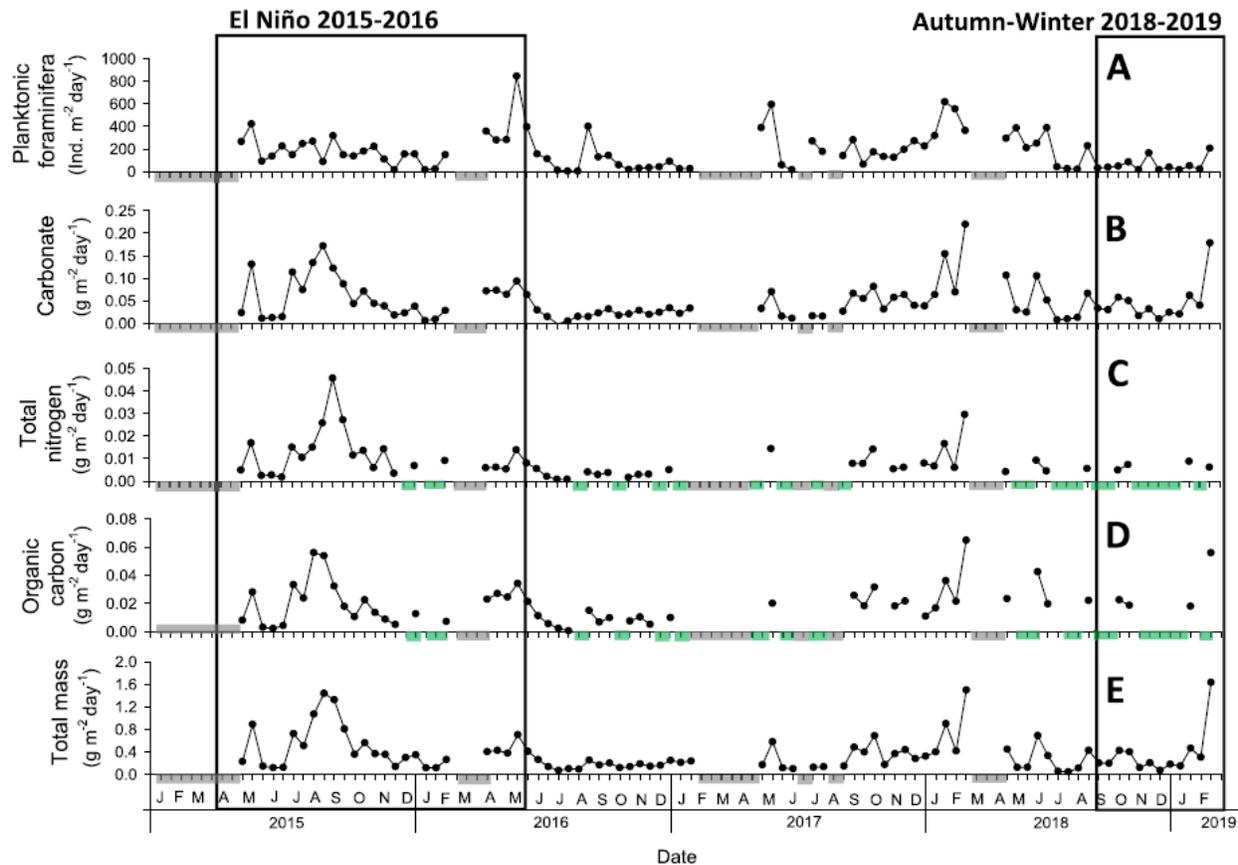


Fig. 5. A) Planktonic foraminiferal flux, B) carbonate flux, C) total nitrogen flux, D) organic carbon flux, and E) Total mass from January 2015 to February 2019. Color bars indicate no data owing to sampling gaps (gray) and insufficient samples (green).

Table 2

Comparison of total mass and organic carbon fluxes ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ ) from sediment traps of Guaymas Basin (Thunell 1998a), Santa Barbara Basin (Thunell 1998b), San Pedro Basin (Thunell et al. 1994), Cariaco Basin (Muller-Karger et al. 2004) and the entrance of the Gulf of California (Mazatlán, México) per hydrographic regime. Range,  $\bar{x}$  = average,  $\sigma$  = standard deviation, z-score (absolute values  $\leq 2$  are comparable;  $> 2$  are significantly different).

Region	Hydrographic regime	Geochemical variable	Range	$\bar{x}$	$\sigma$	z-score
Guaymas Basin	Upwelling Autumn and winter	Total mass	0.12–1.21	0.43	0.22	−0.08
	Non-upwelling Spring and summer	Total mass	0.035–0.79	0.36	0.16	0.66
Santa Barbara Basin	Upwelling Spring and summer	Total mass	0.94–3.57	2.24	0.067	32.05
	Non-upwelling Autumn and winter	Total mass	0.47–2.5	1.64	0.7	2.32
San Pedro Basin	Upwelling Spring	Total mass	0.15–1.0	0.64	0.24	2.67
	Non-upwelling Winter	Total mass	0.58–0.71	0.58	0.26	2.23
Cariaco Basin	Upwelling Winter-spring	Organic carbon	0.01–0.25	0.091	0.05	1.82
	Non-upwelling Summer-autumn	Organic carbon	0.005–0.1	0.029	0.026	1.12
Entrance to the Gulf of California (this study)	Upwelling Winter-spring	Total mass	0.1–1.63	0.47	0.43	1.09
	Non-upwelling Summer-autumn	Total mass	0.05–0.69	0.22	0.14	1.57
Entrance to the Gulf of California (this study)	Upwelling Winter-spring	Organic carbon	0.017–0.065	0.32	0.016	2.0
	Non-upwelling Summer-autumn	Organic carbon	0.011–0.032	0.014	0.008	1.75

indicated by SST values  $> 30^\circ\text{C}$  and Chl-*a* values  $< 0.4\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$  (Fig. 3). The particle fluxes also exhibited lower values during these periods (Fig. 5). Lower particle fluxes were also found in sediment traps from the Guaymas (Thunell 1998a), Santa Barbara (Thunell 1998b), and San Pedro basins (Thunell et al. 1994; Collins et al. 2011) (Table 2).

The summer planktonic foraminiferal assemblages at the entrance of the Gulf of California were somewhat different for each sampled year (Fig. 3). At the beginning of summer 2016, the planktonic foraminifera flux was very low (3.2 to 11.2 individuals  $\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ ), concomitant with low values of Chl-*a* and particle fluxes (Table S5, Fig. 3), which could be related to the end of the previous El Niño conditions that limited the

supply of nutrients to the photic zone. During late summer, the assemblage was dominated by *G. hexagonus* (Factor 2, 10.3 % explained variance) (Fig. 3) when the SST was  $> 30^\circ\text{C}$  ( $r = 0.41$ ,  $p < 0.05$ ) (Table S8). This assemblage's high SST and factor loadings (Fig. 3) suggest that this species prefers warm waters. *G. hexagonus* is more abundant in the thermocline (Hutson 1977; Fairbanks et al. 1982), and during periods when warm and stratified waters are predominant in regions such as the Indian Ocean, ETP, Kuroshio Current, and Panama Basin (Bé and Toulouerlund 1971; Hutson 1977; Fairbanks et al. 1982; Thunell and Reynolds 1984; Eguchi et al. 2003).

*O. universa*-*T. sacculifer*-*G. siphonifera* (Factor 7, 2.7 % explained

variance) and *G. bulloides* (Factor 1) assemblages alternated during the summers of 2017 and 2018 (Fig. 3). Factor 7 species are typical of equatorial and tropical warm waters (Bé and Touloukian 1971; Thunell and Reynolds 1984; Tedesco and Thunell, 2003; Machain-Castillo et al., 2008; Nava-Fernández 2013; Davis et al. 2019), as observed in this study. *O. universa*, *T. sacculifer*, and *G. siphonifera* are more abundant in the thermocline, although they can inhabit a wide range of depths (from 50 m to the surface) (Fairbanks et al. 1982). They bear algal symbionts (Hemleben et al. 1983), which allow them to survive in oligotrophic surface waters with limited food availability. Therefore, this assemblage reflected the presence of tropical waters in the study area.

Although typical of the winter-spring seasons, the *G. bulloides* assemblage was still present during the summers of 2017 and 2018 when the Ekman layer depth, SST, and Chl-*a* showed that upwelling was not active (Table S6, Fig. 3). The presence of *G. bulloides* during these periods could be related to its abundance in California Current Water, which is located at subsurface depths of 50–100 m at the entrance of the Gulf of California throughout the year (Cepeda-Morales et al. 2013; Portela et al. 2016; Ruelas Tolentino and Trasviña Castro, 2017). This condition could allow the presence of *G. bulloides* at the entrance of the Gulf of California during non-upwelling periods, as observed in the California Current System off the Santa Barbara Basin (Field 2004). In the Guaymas Basin, *G. bulloides* were also in moderate abundance during summer (Davis et al. 2019), when their isotopic composition  $\delta^{18}\text{O}$  reflects the temperature of subsurface waters (Wejnert et al. 2010). Therefore, the alternation of warm-water species with the typical winter-spring assemblage in the sediment trap suggests the arrival of warm and stratified waters from the equatorial region (Tropical Surface Water) and the persistence of cold and productive subsurface waters (California Current Water) at the entrance of the Gulf of California.

**3.2.1.3. Autumn scenario.** During the autumn (October–December) of 2016 and 2017, the meteorological and hydrological parameters at the entrance of the Gulf of California showed the onset of upwelling. The wind speed and Ekman layer depth values increased gradually during middle and late autumn (Fig. 3), and the responses of SST, Chl-*a*, and particle fluxes also reflected the activation of upwelling by middle and late autumn (Figs. 3 and 5). By this time, the assemblage dominated by *G. glutinata* (Factor 5, 4.5 % explained variance) reached its highest factor loadings (Fig. 3).

Although present throughout the study sampling period, *G. glutinata* became dominant when wind speed increased in mid-autumn. *G. glutinata* is an opportunistic species (Bé and Touloukian 1971; Hemleben et al. 1989), more abundant in the surface mixed layer (0–50 m) (Fairbanks et al. 1982) and in regions where fronts and eddies generate turbulence (Thunell and Reynolds 1984; Schiebel et al. 2001; Tedesco and Thunell 2003; Machain-Castillo et al. 2008; Nava-Fernández, 2013). In the Guaymas Basin, *G. glutinata* was also more abundant during middle and late autumn under a similar oceanographic regime (Davis et al. 2019). Therefore, we consider that its dominance indicates a transition period at the beginning of upwelling (Fig. 3).

### 3.2.2. El Niño 2015–2016 conditions

According to the MEI v.2, a strong El Niño event occurred from May 2015 to May 2016. The planktonic foraminiferal assemblages and particle fluxes (Figs. 3 and 5) indicate four different stages of development.

**3.2.2.1. Onset stage.** During spring 2015, the effects of El Niño on hydrological conditions at the entrance of the Gulf of California were minimal; wind speed and Ekman layer depth showed decreasing upwelling, Chl-*a*, and particle fluxes tended to decrease, and SST increased (Figs. 3 and 5). In comparison with neutral years, average SST values ( $28.5 \pm 1.9^\circ\text{C}$ ) were slightly higher, without significant differences ( $F = 0.57$ ,  $p > 0.05$ ) and average Chl-*a* ( $0.24 \pm 0.07 \text{ mg m}^{-3}$ ) values slightly lower ( $F = 3.55$ ,  $p > 0.05$ ) (Table S9). *G. bulloides* was the

dominant assemblage, as in the other springs; however, it was replaced earlier (May) by the warm water assemblage *G. menardii* (Fig. 3), indicating the earlier arrival of warm water masses to the study site and the first El Niño influence.

**3.2.2.2. Development stage.** During the summer of 2015, the MEI v.2 showed El Niño conditions were more intense (Fig. 2, Table S7). Contrarily to the other summers (2016 and 2017), wind speed and Ekman layer depth increased significantly ( $p < 0.05$ ) toward late summer and Chl-*a* reached high concentrations (average  $0.49 \pm 0.48 \text{ mg m}^{-3}$ ). Particle fluxes remained high (total mass reached the highest values of all analyzed summers,  $p < 0.05$ ) (Table S7, Figs. 3, 5). These results do not agree with the expected effects of El Niño conditions (low phytoplankton biomass owing to the absence of nutrient-rich waters). However, the increases in the wind speed and Ekman layer depth during this summer could be related to the high concentrations of Chl-*a* observed during August 2015, when a filament with high Chl-*a* content associated with a mesoscale structure was located near the sediment trap location (Coria-Monter et al. 2018; Fig. 4p).

Modeling studies have shown that mesoscale anticyclonic eddies at the entrance of the Gulf of California are common during summer (Lavín et al. 2013) and that the frequency and intensity of these eddies increase during strong El Niño events (Zamudio et al. 2001; Godínez et al. 2010). The thermocline rise at the edge of the eddies promotes the input of nutrients to the euphotic zone, which stimulates phytoplankton and zooplankton abundance (Rodríguez et al., 2003; Lavín et al. 2013; Coria-Monter et al. 2014; Durán-Campos et al. 2015).

At the beginning of summer, the planktonic foraminiferal assemblage dominated by *G. glutinata* was predominant (Fig. 3), including the Chl-*a* peak in mid-August. As mentioned previously, *G. glutinata* is an opportunistic species (Hemleben et al. 1989) that is tolerant to the turbulence generated by wind and responds to food availability (Schiebel et al. 2001; Machain-Castillo et al. 2008), which could be related to the presence of mesoscale structures in the area reported by Coria-Monter et al. (2018). By late summer, there was an alternance of assemblages dominated by the warm species *G. hexagonus*, *G. tenellus*, and *G. ruber* (Fig. 3), indicating the presence of warm and stratified waters characteristic of summer conditions.

**3.2.2.3. Climax stage.** From the end of summer 2015 to mid-autumn, MEI v.2 shows that the El Niño event reached its maximum intensity with values over 2, maintaining high values until mid-winter 2016, and lower values until mid-spring 2016 (Fig. 3). Average SST was  $29.5 \pm 2.0^\circ\text{C}$  during autumn 2015 and  $25.2 \pm 0.4^\circ\text{C}$  during winter 2016, the highest of all analyzed winters ( $F = 6.09$ ,  $p < 0.05$ ) (Table S7, Fig. S1). The phytoplankton biomass (as indicated by Chl-*a*) also was affected as the average Chl-*a* was low during autumn 2015 ( $0.27 \pm 0.05 \text{ mg m}^{-3}$ ) and winter 2016 ( $0.25 \pm 0.05 \text{ mg m}^{-3}$ , the lowest value of all winters) (Table S7, Fig. S1). Particle fluxes decreased from autumn 2015 to early spring 2016 (Fig. 5).

The effects of El Niño in 2015–2016 at the entrance of the Gulf of California are comparable to those of the 1982–1983 and 1997–1998 El Niño events, which also produced large SST increases and primary productivity reductions related to the massive intrusion of equatorial waters and deepening of the thermocline at the entrance of the Gulf of California (Santamaría-del-Angel et al., 1994; Lavín et al. 2003; Hidalgo-González and Alvarez-Borrego, 2004; Kahru et al., 2004), the Guaymas Basin (Thunell et al. 1999), and the southern Mexican Pacific (Lluch-Cota et al. 1997; Aguirre-Gómez et al. 2003).

During this stage, the dominant assemblage was *G. tenellus* (Factor 3, 8.1 % explained variance) (Table S5, Fig. 3), which correlated with MEI v.2 ( $r = 0.73$ ,  $p < 0.05$ ) but was virtually absent during the rest of the sampling period, when the influence of strong El Niño conditions was lost (Fig. 3). The relative abundance of *G. tenellus* ranged from 14.7 to 31.1 % during this stage. In the Guaymas Basin, *G. tenellus* was observed

with a very low abundance along with the record (<1.6 %) and did not show a clear seasonal pattern (Davis et al. 2019). *G. tenellus* was abundant in tropical and subtropical waters during water column stratification, deep thermocline, and higher SST (Conan and Brummer 2000; Peeters and Brummer 2002; Schulz et al. 2002; Eguchi et al. 2003; Yamasaki et al. 2008). These conditions are typical during strong El Niño events at the entrance of the Gulf of California (Lavín et al. 2003; Lavín and Marinone 2003), and could promote an increase in the abundance of *G. tenellus*. Therefore, the dominance of *G. tenellus* at the entrance of the Gulf of California suggests the intrusion of warm waters from the equatorial region because *G. tenellus* is only dominant during the El Niño maximum intensity (supported by the species indicator analyses, IndVal = 0.94,  $p < 0.05$ ), we consider that this species could be a good indicator of strong El Niño events in the sedimentary record.

**3.2.2.4. Final stage.** During spring 2016, MEI v.2 shows that El Niño 2015–2016 reduced its intensity (Fig. 3); wind speed and Ekman layer depth decreased, and SST increased toward late spring, Chl-*a* remained low with an average of  $0.23 \pm 0.04 \text{ mg m}^{-3}$ , the lowest of all analyzed springs ( $F = 3.55$ ,  $p < 0.05$ ) (Table S7; Fig. S1), and particle fluxes decreased at the end of spring, as in the neutral years (Table S6, Fig. 5). The low Chl-*a* and particle fluxes during this period could have been caused by the presence of a deeper thermocline (50 m during spring 2016; Fig. 4) as the Ekman layer depth during spring 2016 ranged from 3.6 to 37.6 m, with an average of  $13 \pm 6 \text{ m}$  (Table S7, Fig. 3), which limits Ekman pumping to the mixed layer and the input of nutrients toward surface waters (Fig. 3). These results reflect the lower effect of El Niño 2015–2016 on SST, phytoplankton biomass, and particle fluxes than during the climax stage.

During spring 2016, the assemblages dominated by *G. bulloides* and *G. menardii* (Factor 6, 4.0 % explained) alternated (Fig. 3). The presence of *G. bulloides*, as in the summers of 2017 and 2018, possibly reflected the subsurface cold and productive waters of the California Current. *G. menardii* is more abundant in the thermocline (Fairbanks et al. 1982; Watkins et al. 1996) and has been found in warm and stratified waters (Fairbanks et al. 1982; Thunell and Reynolds 1984; Machain-Castillo et al. 2008; Nava-Fernández 2013). In the Guaymas Basin, the maximum abundance of *G. menardii* was associated with increased stratification and intrusion of tropical waters during El Niño 1991–1992 (Davis et al. 2019).

The alternation of the *G. bulloides* and *G. menardii* assemblages at the entrance of the Gulf of California during spring 2016 reflects the end stage of El Niño 2015–2016, when upwelling occurred. Still, the presence of a deeper thermocline decreased the surface fertilization. Therefore, *G. bulloides* was present in the subsurface waters. However, it was not as dominant as in other springs, and the presence of warm waters and a strong thermocline allowed *G. menardii* to increase its presence (Fig. 3). Nava-Fernández (2013), also found the alternation of these two planktonic foraminiferal assemblages during El Niño 2006–2007 (winter-spring) in the Gulf of Tehuantepec, México.

### 3.2.3. Autumn-winter 2018–2019

From autumn 2018 to mid-winter 2019, MEI v.2 indicates relaxing, positive SST anomaly conditions. However, positive values (Fig. 3) and ONI 3.4 indicates a weak El Niño event (Climate Prediction Center 2022) of the central Pacific type (Wang and Cai 2020; McPhaden et al. 2021) with maximum SST anomalies confined to the central Pacific (Kao and Yu 2009). During this period, regardless of the high Ekman layer depth, the fertilization effect of upwelling (indicated by Chl-*a* and particle fluxes) was not fully observed until February (Fig. 3), possibly because of the presence of a deeper thermocline. However, we do not have evidence at this time.

The dominant planktonic foraminiferal assemblage was *G. ruber* (Fig. 3). *G. ruber* was present during the four years analyzed (the second most abundant species) and did not show a clear seasonal pattern

(Table S2). This species has a tropical-subtropical distribution (Bé and Tolderlund 1971; Hemleben et al. 1989), is more abundant in the first 20 m of the surface mixed layer (Farbanks et al. 1982), and is considered an opportunistic species because of its tolerance to a wide range of salinity and temperature (Bé and Tolderlund 1971; Hemleben et al. 1989). *G. ruber* bears algal symbionts (Hemleben et al. 1983), which could allow it to survive in oligotrophic surface waters with limited food availability. In the Guaymas Basin (Davis et al. 2019) and other regions (Thunell and Reynolds 1984; Kincaid et al. 2000) *G. ruber* was more abundant in sediment traps during periods of higher SST and lower particle flux.

Although the MEI v.2 index did not clearly show the presence of El Niño conditions during autumn–winter 2018–2019, the dominance of warm water and the opportunistic *G. ruber* assemblage agrees with the delay in the fertilization effects of upwelling, probably due to a deeper thermocline during autumn and early winter. By the end of the sampling period (February 2019), typical upwelling nutrient-rich conditions were suggested by the presence and abundance of the *G. bulloides* assemblage.

This study demonstrated that planktonic foraminiferal assemblages and particle fluxes at the entrance of the Gulf of California, offshore Mazatlán, México, were influenced by seasonal meteorological-oceanic dynamics from 2015 to 2019. The environmental changes associated with the strong El Niño 2015–2016 event also modified the ecological structure of planktonic foraminiferal assemblages, which allowed the dominance of an assemblage dominated by warm species that indicated the presence of more equatorial waters.

## 4. Conclusions

The study of planktonic foraminiferal assemblages and particle flux patterns in a sediment trap at the entrance of the Gulf of California from 2015 to 2019 reflected the main seasonal oceanographic scenarios.

This general pattern was modified by the strong El Niño 2015–2016 event, when winter values of SST were the highest and Chl-*a* concentrations were the lowest of the entire record from 2015 to 2019, and *G. tenellus* dominated during the period of maximum intensity, indicating the intrusion and prevalence of warm and oligotrophic waters during winter and spring. This species could be a good indicator of strong El Niño events in sedimentary records. Our findings support the hypothesis that during the El Niño 2015–2016 event, the planktonic foraminiferal assemblages at the entrance of the Gulf of California will show the dominance of warm-water species.

This study reveals the effects of ENSO on ocean dynamics at the entrance of the Gulf of California. It provides a better understanding of how these events influence particle fluxes and planktonic foraminiferal assemblages. The combination of satellite images with foraminifera, particle fluxes, wind speed, and Ekman layer depth are useful tools for interpreting ENSO events in the sedimentary record of the region, which will aid in recognizing its long-term behavior.

### Declaration of Competing Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

### Data availability

Data will be made available on request.

### Acknowledgments

The first author thanks Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología, UNAM and the financial support provided by the Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) for the doctoral scholarship (336110). We thank ICML-UNAM for funding this project. The UNAM provided

support for field sampling through oceanographic campaigns MAZ I, II, III, and IV, and we thank the crew of RV “El Puma” for their help in sampling acquisition, the UNIMAR platform, and León F. Álvarez-Sánchez for his help in obtaining and processing satellite images. We are also grateful to the IRD for funding an academic stay at XANF, the ALYSES analytical platform for their support for carbon and nitrogen analyses, and to Dr. Jaime Gómez-Gutiérrez and two anonymous reviewers for their comments for improving the manuscript.

## Appendix A. Supplementary data

Supplementary data to this article can be found online at <https://doi.org/10.1016/j.pocan.2022.102880>.

## References

- Aguirre-Gómez, R., Salmerón, O., Álvarez, R., 2003. Effects of ENSO off the southwest coast of Mexico, 1996–1999. *Geofis. Int.* 42, 377–388.
- Álvarez-Borrego, S., 2010. Physical, chemical and biological oceanography of the Gulf of California. In: Brusca, R. (Ed.), *The Gulf of California: Biodiversity and Conservation*. The University of Arizona Press and ASDM, pp. 24–48.
- Álvarez-Borrego, S., 2012. Phytoplankton biomass and production in the Gulf of California: A review. *Bot. Mar.* 55, 119–128. <https://doi.org/10.1515/BOT.2011.105>.
- Amador, J.A., Alfaro, E.J., Lizano, O.G., Magaña, V.O., 2006. Atmospheric forcing of the eastern tropical Pacific: A review. *Prog. Oceanogr.* 69, 101–142. <https://doi.org/10.1016/j.pocan.2006.03.007>.
- Bandy, O.L., 1961. Distribution of Foraminifera, Radiolaria and Diatoms in Sediments of the Gulf of California. *Micropaleontology* 7, 26. <https://doi.org/10.2307/1484140>.
- Bé, A.W.H., Tolderlund, D.S., 1971. Distribution and ecology of planktonic foraminiferal in surface waters of the Atlantic Indian Oceans. In: Funnell, B., Riedel, W. (Eds.), *The Micropaleontology of Oceans*. Cambridge University Press, London, pp. 105–150.
- Black, D.E., Thunell, R.C., Tappa, E.J., 2001. Planktonic foraminiferal response to the 1997–1998 El Niño: A sediment-trap record from the Santa Barbara Basin. *Geology* 29, 1075–1078. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2001\)029<1075:PRFITE>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2001)029<1075:PRFITE>2.0.CO;2).
- Brinton, E., Fleming, A., Siegel-Causey, D., 1986. *The Temperate and Tropical Planktonic Biotas of the Gulf of California*. California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations Reports, La Jolla, California.
- Cepeda-Morales, J., Gaxiola-Castro, G., Beier, E., Godínez, V.M., 2013. The mechanisms involved in defining the northern boundary of the shallow oxygen minimum zone in the eastern tropical Pacific Ocean off Mexico. *Deep Res. Part I Oceanogr. Res. Pap.* 76, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2013.02.004>.
- Climate Prediction Center Internet Team, 2022. Cold & Warm Episodes by Season [WWW Document]. NOAA/ Nat. Weather Serv. Nat. Centers Environ. Predict. Clim. Predict. Cent. URL [https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis\\_monitoring/ensostuff/ONI\\_v5.php](https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php) (accessed 5.14.22).
- Collins, L.E., Berelson, W., Hammond, D.E., Knapp, A., Schwartz, R., Capone, D., 2011. Particle fluxes in San Pedro Basin, California: A four-year record of sedimentation and physical forcing. *Deep Res. Part I Oceanogr. Res. Pap.* 58, 898–914. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2011.06.008>.
- Conan, S.H., Brummer, G.J.A., 2000. Fluxes of planktonic foraminiferal in response to monsoonal upwelling on the Somalia Basin margin. *Deep Res. Part II Top. Stud. Oceanogr.* 47, 2207–2227. [https://doi.org/10.1016/S0967-0645\(00\)00022-9](https://doi.org/10.1016/S0967-0645(00)00022-9).
- Coria-Monter, E., Monreal-Gómez, M.A., Salas-de-León, D.S., Aldeco-Ramírez, J., Merino-Ibarra, M., 2014. Differential distribution of diatoms and dinoflagellates in a cyclonic eddy confined in the Bay of La Paz, Gulf of California. *J. Geophys. Res. Ocean.* 119, 6258–6268. <https://doi.org/10.1038/175238c0>.
- Coria-Monter, E., Monreal-Gómez, M.A., De León, D.A.S., Durán-Campos, E., 2018. Impact of the “godzilla El Niño” Event of 2015–2016 on Sea-Surface Temperature and Chlorophyll-*a* in the Southern Gulf of California, Mexico, as Evidenced by Satellite and in Situ Data. *Pacific Sci.* 72, 411–422. <https://doi.org/10.2984/72.4.2>.
- Davis, C.V., Fuqua, L., Pride, C., Thunell, R., 2019. Seasonal and interannual changes in planktonic foraminiferal fluxes and species composition in Guaymas Basin, Gulf of California. *Mar. Micropaleontol.* 149, 75–88. <https://doi.org/10.1016/j.marmicro.2019.05.001>.
- Dufrene, M., Legendre, P., 1997. Species Assemblages and Indicator Species: The Need for a Flexible Asymmetrical Approach. *Ecol. Monogr.* 67, 345–366.
- Durán-Campos, E., Salas-de-León, D.A., Monreal-Gómez, M.A., Aldeco-Ramírez, J., Coria-Monter, E., 2015. Differential zooplankton aggregation due to relative vorticity in a semi-enclosed bay. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 164, 10–18. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2015.06.030>.
- Eguchi, N.O., Ujiie, H., Kawahata, H., Taira, A., 2003. Seasonal variations in planktonic foraminiferal at three sediment traps in the Subarctic, Transition and Subtropical zones of the central North Pacific Ocean. *Mar. Micropaleontol.* 48, 149–163. [https://doi.org/10.1016/S0377-8398\(03\)00020-3](https://doi.org/10.1016/S0377-8398(03)00020-3).
- Emilsson, I., Alatorre, M.A., 1997. Evidencias de un remolino ciclónico de mesoescala en la parte sur del Golfo de California, in: Lavín, M.F. (Ed.), *Contribuciones a La Oceanografía Física En México*. Monografía No. 3. Unión Geofísica Mexicana, pp. 173–182. (in Spanish).
- Fairbanks, R.G., Sverdrup, M., Free, R., Wiebe, P.H., Bé, A.W.H., 1982. Vertical distribution and isotopic fractionation of living planktonic foraminiferal from the Panama Basin. *Nature* 298, 841–844. <https://doi.org/10.1038/298841a0>.
- Färber-Lorda, J., Trasvina, A., Cortés-Verdín, P., 2010. Summer distribution of euphausiids in the entrance of the Sea of Cortés in relation to hydrography. *Deep Res. Part II Top. Stud. Oceanogr.* 57, 631–641. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2009.10.012>.
- Fatela, F., Taborda, R., 2002. Confidence limits of species proportions in microfossil assemblages. *Mar. Micropaleontol.* 45, 169–174. [https://doi.org/10.1016/S0377-8398\(02\)00021-X](https://doi.org/10.1016/S0377-8398(02)00021-X).
- Fiedler, P.C., Talley, L.D., 2006. Hydrography of the eastern tropical Pacific: A review. *Prog. Oceanogr.* 69, 143–180. <https://doi.org/10.1016/j.pocan.2006.03.008>.
- Field, D.B., 2004. Variability in vertical distributions of planktonic foraminiferal in the California current: Relationships to vertical ocean structure. *Paleoceanography* 19. <https://doi.org/10.1029/2003PA000970>.
- Ganeshram, R.S., Pedersen, T.F., 1998. Glacial-interglacial variability in upwelling and bioproductivity off NW Mexico: Implications for quaternary paleoclimate. *Paleoceanography* 13, 634–645. <https://doi.org/10.1029/98PA02508>.
- Gibson, K.A., Thunell, R.C., Machain-Castillo, M.L., Fehrenbacher, J., Spero, H.J., Wejnert, K., Nava-Fernández, X., Tappa, E.J., 2016. Evaluating controls on planktonic foraminiferal geochemistry in the Eastern Tropical North Pacific. *Earth Planet. Sci. Lett.* 452, 90–103. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2016.07.039>.
- Godínez, V.M., Beier, E., Lavín, M.F., Kurczyn, J.A., 2010. Circulation at the entrance of the Gulf of California from satellite altimeter and hydrographic observations. *J. Geophys. Res. Ocean.* 115, 1–15. <https://doi.org/10.1029/2009JC005705>.
- Hemleben, C.H., Spindler, M., Anderson, O.R., 1989. Modern planktonic foraminiferal. *Geobios.* [https://doi.org/10.1016/S0016-6995\(89\)80106-1](https://doi.org/10.1016/S0016-6995(89)80106-1).
- Hendrickx, M., Serrano, E.D., 2010. Impacto de la zona de mínimo de oxígeno sobre los corredores pesqueros en el pacífico mexicano. *Interciencia* 3, 12–18 in Spanish.
- Herrera-Becerril, C.A., Sánchez-Cabeza, J.A., Álvarez Sánchez, L.F., Lara-Cera, A.R., Ruiz-Fernández, A.C., Cardoso-Mohedano, J.G., Machain-Castillo, M.L., Colas, F., 2021. Statistical identification of coastal hypoxia events controlled by wind-induced upwelling. *Cont. Shelf Res.* 233. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2021.104634>.
- Herrera-Becerril, C.A., 2020. Hipoxia en aguas superficiales de una zona costera en la entrada del Golfo de California (Mazatlán, Sinaloa) y su relación con surgencias costeras. Tesis Maest. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Hidalgo-González, R.M., Álvarez-Borrego, S., 2004. Total and new production in the Gulf of California estimated from ocean color data from the satellite sensor SeaWiFS. *Deep Res. Part II Top. Stud. Oceanogr.* 51, 739–752. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2004.05.006>.
- Hutson, W.H., 1977. Variations in planktonic foraminiferal assemblages along north-south transects in the Indian Ocean. *Mar. Micropaleontol.* 2, 47–66. [https://doi.org/10.1016/0377-8398\(77\)90005-6](https://doi.org/10.1016/0377-8398(77)90005-6).
- Kahru, M., Marinone, S.G., Lluch-Cota, S.E., Parés-Sierra, A., Mitchell, B.G., 2004. Ocean-color variability in the Gulf of California: Scales from days to ENSO. *Deep Res. Part II Top. Stud. Oceanogr.* 51, 139–146. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2003.04.001>.
- Kao, H.Y., Yu, J.Y., 2009. Contrasting Eastern-Pacific and Central-Pacific types of ENSO. *J. Clim.* 22, 615–632. <https://doi.org/10.1175/2008JCLI2309.1>.
- Kennett, J.P., Srinivasan, M.S., 1983. *Neogene Planktonic Foraminifera. A Phylogenetic Atlas*. Hutchinson Ross Publishing Company, Stroudsburg, Pennsylvania.
- Kincaid, E., Thunell, R.C., Le, J., Lange, C.B., Weinheimer, A.L., Reid, F.M.H., 2000. Planktonic foraminiferal fluxes in the Santa Barbara Basin: Response to seasonal and interannual hydrographic changes. *Deep Res. Part II Top. Stud. Oceanogr.* 47, 1157–1176. [https://doi.org/10.1016/S0967-0645\(99\)00140-X](https://doi.org/10.1016/S0967-0645(99)00140-X).
- Lavín, M.F., Beier, E., Badan, A., 1997. Estructura hidrográfica y circulación del Golfo de California: Escalas estacional e interanual, in: Lavín M. F. (Ed.), *Contribuciones a La Oceanografía Física En México*, Monografía No. 3. Unión Geofísica Mexicana, pp. 141–171.
- Lavín, M.F., Marinone, S.G., 2003. An Overview of the Physical Oceanography of Nonlinear Process. *Geophys. Fluid Dyn.* 173–204.
- Lavín, M.F., Palacios-Hernández, E., Cabrera, C., 2003. Sea surface temperature anomalies in the Gulf of California. *Geofis. Int.* 42, 363–375.
- Lavín, M.F., Castro, R., Beier, E., Godínez, V.M., 2013. Mesoscale eddies in the southern Gulf of California during summer: Characteristics and interaction with the wind stress. *J. Geophys. Res. Ocean.* 118, 1367–1381. <https://doi.org/10.1002/jgrc.20132>.
- Lluch-Cota, S.E., Álvarez-Borrego, S.A., Santamaría del Angel, E.M., Müller-Karger, F.E., Hernández-Vázquez, S., 1997. The Gulf of Tehuantepec and adjacent areas: Spatial and temporal variation of satellite-derived photosynthetic pigments. *Ciencias Marinas* 23, 329–340.
- Lluch-Cota, S.E., Aragón-Noriega, E.A., Arreguín-Sánchez, F., Auriolos-Gamboa, D., Jesús Bautista-Romero, J., Brusca, R.C., Cervantes-Duarte, R., Cortés-Altamirano, R., Del-Monte-Luna, P., Esquivel-Herrera, A., Fernández, G., Hendrickx, M.E., Hernández-Vázquez, S., Herrera-Cervantes, H., Kahru, M., Lavín, M., Lluch-Belda, D., Lluch-Cota, D.B., López-Martínez, J., Marinone, S.G., Nevárez-Martínez, M.O., Ortega-García, S., Palacios-Castro, E., Parés-Sierra, A., Ponce-Díaz, G., Ramírez-Rodríguez, M., Salinas-Zavala, C.A., Schwartzlose, R.A., Sierra-Beltrán, A.P., 2007. The Gulf of California: Review of ecosystem status and sustainability challenges. *Prog. Oceanogr.* 73, 1–26. <https://doi.org/10.1016/j.pocan.2007.01.013>.
- López-Sandoval, D.C., Lara-Lara, J.R., Lavín, M.F., Álvarez-Borrego, S., Gaxiola-Castro, G., 2009. Primary productivity observations in the eastern tropical Pacific off Cabo Corrientes. Mexico. *Ciencias Mar.* 35, 169–182. <https://doi.org/10.7773/cm.v35i2.1530>.
- Machain-Castillo, M.L., Monreal-Gómez, M.A., Arellano-Torres, E., Merino-Ibarra, M., González-Chávez, G., 2008. Recent planktonic foraminiferal distribution patterns and their relation to hydrographic conditions of the Gulf of Tehuantepec, Mexican

- Pacific. Mar. Micropaleontol. 66, 103–119. <https://doi.org/10.1016/j.marmicro.2007.08.003>.
- McPhaden, M.J., Lee, T., Fournier, S., Balmaseda, M.A., 2021. ENSO Observations. In: McPhaden, M.J., Santoso, A., Cai, W. (Eds.), *El Niño Southern Oscillation in a Changing Climate*. American Geophysical Union and John Wiley and Sons Inc, NJ, USA, pp. 41–63.
- Muller-Karger, F., Varela, R., Thunell, R., Astor, Y., Zhang, H., Luerssen, R., Hu, C., 2004. Processes of coastal upwelling and carbon flux in the Cariaco Basin. *Deep Res. Part II Top. Stud. Oceanogr.* 51, 927–943. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2003.10.010>.
- Nava-Fernández, X.A., 2013. Respuesta de los foraminíferos planctónicos a las variaciones oceánicas del periodo 2006–2009 en el Noroeste del Golfo de Tehuantepec. Universidad Nacional Autónoma de México, Tesis Maestría in Spanish.
- Ontiveros-Cuadras, J.F., Thunell, R., Ruiz-Fernández, A.C., Benitez-Nelson, C., Machain-Castillo, M.L., Tappa, E., Sanchez-Cabeza, J.A., 2019. Centennial OMs changes in the NW Mexican Margin from geochemical and foraminiferal sedimentary records. *Cont. Shelf Res.* 176, 64–75. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2019.02.009>.
- Ortiz, J.D., Mix, A.C., 1992. The spatial distribution and seasonal succession of planktonic foraminifera in the California Current off Oregon, September 1987–September 1988. In *Upwelling Systems: Evolution Since the Early Miocene*. Geological Society special publication 64, 197–213.
- Ortiz-Ahumada, J.C., Álvarez-Borrego, S., Gómez-Valdés, J., 2018. Efectos de eventos estacionales e interanuales en la biomasa y producción fitoplanctónicas derivadas de satélite en el extremo sur del Sistema de la Corriente de California en el periodo 2003–2016. *Ciencias Mar.* 44, 1–20. <https://doi.org/10.7773/cm.v44i1.2743>.
- Parker, F.L., 1973. Living planktonic foraminifera from the Gulf of California. *J. Foraminif. Res.* 3, 70–77. <https://doi.org/10.2113/gsjfr.3.2.70>.
- Peeters, F.J.C., Brummer, G.J.A., 2002. The seasonal and vertical distribution of living planktic foraminiferal in the NW Arabian Sea. *Geol. Soc. Spec. Publ.* 195, 463–497. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2002.195.01.26>.
- Pennington, J.T., Mahoney, K.L., Kuwahara, V.S., Kolber, D.D., Calienes, R., Chavez, F.P., 2006. Primary production in the eastern tropical Pacific: A review. *Prog. Oceanogr.* 69, 285–317. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2006.03.012>.
- Pond, S., Pickard, G.L., 1983. *Biological Oceanography: An Introductory Introductory Dynamical Oceanography*, 2d ed. Butterworth-Heinemann Ltd, Oxford.
- Portela, E., Beier, E., Barton, E.D., Castro, R., Godínez, V., Palacios-Hernández, E., Fiedler, P.C., Sánchez-Velasco, L., Trasviña, A., 2016. Water masses and circulation in the tropical Pacific off central Mexico and surrounding areas. *J. Phys. Oceanogr.* 46, 3069–3081. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-16-0068.1>.
- Rodríguez, F., Varela, M., Fernández, E., Zapata, M., 2003. Phytoplankton and pigment distributions in an anticyclonic slope water oceanic eddy (SWODDY) in the southern Bay of Biscay. *Mar. Biol.* 143, 995–1011. <https://doi.org/10.1007/s00227-003-1129-1>.
- Rozo-Vera, G.A., Carreño, A.L., 1988. Distribución de Foraminíferos Planctónicos en Sedimentos Superficiales del Golfo de California. *Rev. Inst. Geol.* 7, 217–225.
- Ruelas Tolentino, J.A., Trasviña Castro, A., 2017. Hydrography of the entrance to the Gulf of California: The upper limit of the oxygen minimum. *Rev. Bio Ciencias* 4, 1–21. <https://doi.org/10.15741/revbio.04.05.02>.
- Sánchez-Velasco, L., Beier, E., Godínez, V.M., Barton, E.D., Santamaría-del-Angel, E., Jiménez-Rosemberg, S.P.A., Marinone, S.G., 2017. Hydrographic and fish larvae distribution during the “Godzilla El Niño 2015–2016” in the northern end of the shallow oxygen minimum zone of the Eastern Tropical Pacific Ocean. *J. Geophys. Res. Ocean.* 122, 2156–2170. <https://doi.org/10.1002/2016JC012622>.
- Santamaría-del-Angel, E., Alvarez-Borrego, S., Muller-Karger, F.E., 1994. The 1982–1984 El Niño in the Gulf of California as seen in coastal zone color scanner imagery. *J. Geophys. Res.* 99, 7423–7431.
- Sautter, L.R., Sancetta, C., 1992. Seasonal associations of phytoplankton and planktic foraminifera in an upwelling region and their contribution to the seafloor. *Mar. Micropaleontology.* 18, 263–278.
- Schiebel, R., Wanik, J., Bork, M., Hemleben, C., 2001. Planktic foraminiferal production stimulated by chlorophyll redistribution and entrainment of nutrients. *Deep Res. Part I Oceanogr. Res. Pap.* 48, 721–740. [https://doi.org/10.1016/S0967-0637\(00\)00065-0](https://doi.org/10.1016/S0967-0637(00)00065-0).
- Schulz, H., von Rad, U., Ittekkot, V., 2002. Planktic foraminiferal, particle flux and oceanic productivity off Pakistan, NE Arabian Sea: Modern analogues and application to the palaeoclimatic record. *Geol. Soc. Spec. Publ.* 195, 499–516. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2002.195.01.27>.
- Serrano, D., 2012. La zona del mínimo de oxígeno en el Pacífico mexicano, in: Zamorano P., Hendrickx M. E., C.M. (Ed.), *Biodiversidad y Comunidades Del Talud Continental Del Pacífico Mexicano*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), México, pp. 105–119. (in Spanish).
- Spindler, M., Hemleben, C.H., Salomons, J.B., Smit, L.P., 1984. Feeding behavior of some planktic foraminifera in laboratory cultures. *J. Foraminif. Res.* 14, 237–249.
- StatSoft Inc., STATISTICA (Data Analysis Software System), version 10. <http://www.statsoft.com>.
- Tedesco, K.A., Thunell, R.C., 2003. Seasonal and interannual variations in planktonic foraminiferal flux and assemblage composition in the Cariaco Basin, Venezuela. *J. Foraminif. Res.* 33, 192–210. <https://doi.org/10.2113/33.3.192>.
- The Physical Sciences Laboratory, 2022. Multivariate ENSO Index Version 2 (MEI.v2) [WWW Document]. *Natl. Ocean. Atmos. Adm.* URL <https://psl.noaa.gov/ens/mei/> (accessed 12.22.21).
- Thunell, R.C., 1998a. Seasonal and annual variability in particle fluxes in the Gulf of California: A response to climate forcing. *Deep Res. Part I Oceanogr. Res. Pap.* 45, 2059–2083. [https://doi.org/10.1016/S0967-0637\(98\)00053-3](https://doi.org/10.1016/S0967-0637(98)00053-3).
- Thunell, R.C., 1998b. Particle fluxes in a coastal upwelling zone: Sediment trap results from Santa Barbara Basin, California. *Deep Res. Part II Top. Stud. Oceanogr.* 45, 1863–1884. [https://doi.org/10.1016/S0967-0645\(98\)00200-9](https://doi.org/10.1016/S0967-0645(98)00200-9).
- Thunell, R., Pride, C., Ziveri, P., Muller-Karger, F., Sancetta, C., Murray, D., 1996. Plankton response to physical forcing in the Gulf of California. *J. Plankton Res.* 18, 2017–2026. <https://doi.org/10.1093/plankt/18.11.2017>.
- Thunell, R., Tappa, E., Pride, C., Kincaid, E., 1999. Sea-surface temperature anomalies associated with the 1997–1998 El Niño recorded in the oxygen isotope composition of planktonic foraminifera. *Geology* 27, 843–846. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1999\)027<0843:SSTAAS>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1999)027<0843:SSTAAS>2.3.CO;2).
- Thunell, R., Benitez-Nelson, C., Varela, R., Astor, Y., Muller-Karger, F., 2007. Particulate organic carbon fluxes along upwelling-dominated continental margins: Rate and mechanisms. *Global Biogeochem. Cycles* 21, 1–12. <https://doi.org/10.1029/2006GB002793>.
- Thunell, R.C., Pilskaln, C.H., Tappa, E., Sautter, L.R., 1994. Temporal variability in sediment fluxes in the San Pedro Basin, southern California bight. *Cont. Shelf Res.* 14, 333–352. [https://doi.org/10.1016/0278-4343\(94\)90022-1](https://doi.org/10.1016/0278-4343(94)90022-1).
- Thunell, R.C., Reynolds, L.A., 1984. Sedimentation of Planktonic Foraminiferal: Seasonal Changes in Species Flux in the Panama Basin. *Micropaleontology* 30, 243. <https://doi.org/10.2307/1485688>.
- Wang, G., Cai, W., 2020. Two-year consecutive concurrences of positive Indian Ocean Dipole and Central Pacific El Niño preconditioned the 2019/2020 Australian “black summer” bushfires. *Geosci. Lett.* 7 <https://doi.org/10.1186/s40562-020-00168-2>.
- Watkins, J.M., Mix, A.C., Wilson, J., 1996. Living planktic foraminiferal: Tracers of circulation and productivity regimes in the central equatorial Pacific. *Deep Res. Part II Top. Stud. Oceanogr.* 43, 1257–1282. [https://doi.org/10.1016/0967-0645\(96\)00008-2](https://doi.org/10.1016/0967-0645(96)00008-2).
- Wejnert, K.E., Pride, C.J., Thunell, R.C., 2010. The oxygen isotope composition of planktonic foraminiferal from the Guaymas Basin, Gulf of California: Seasonal, annual, and interspecies variability. *Mar. Micropaleontol.* 74, 29–37. <https://doi.org/10.1016/j.marmicro.2009.11.002>.
- Yamasaki, M., Sasaki, A., Oda, M., Domitsu, H., 2008. Western equatorial Pacific planktic foraminiferal fluxes and assemblages during a La Niña year (1999). *Mar. Micropaleontol.* 66, 304–319. <https://doi.org/10.1016/j.marmicro.2007.10.006>.
- Zamudio, L., Leonardi, A.P., Meyers, S.D., O'Brien, J.J., 2001. ENSO and Eddies on the Southwest Coast of Mexico. *Geophys. Res. Lett.* 28 (1), 13–16.

## Capítulo 4

### Variabilidad estacional e interanual del aporte de material terrígeno en la BGC de 2015 a 2019

En este capítulo se resuelven los siguientes objetivos:

- Conocer los cambios en la cantidad del material terrígeno en las trampas, mediante el análisis elemental de Al, Ti, Fe y Zr.
- Conocer los patrones de precipitación y descargas de ríos durante el periodo de muestreo, mediante series de tiempo de dichos parámetros.
- Relacionar lo anterior con las diferentes fases del ENOS de 2015 a 2019.

### Material y métodos

#### *Flujos de elementos indicadores de aporte Terrígeno*

Para conocer la proporción de Al, Ti, Fe, y Zr se pesaron 25 mg de sedimento seco macerado de cada muestra y de material de referencia certificado HISS-1, MESS-3, PACS-2 Canadian National Research Council, se realizaron 4 réplicas del material de referencia y 8 de las muestras, con una incertidumbre menor al 2 %. Las muestras fueron colocadas en envases de politertrafluoroetileno y atacados con ácido nítrico al 65 %, ácido fluorhídrico al 40 % y ácido tetraoxiclórico a 150 °C para eliminar materia orgánica y sílice de las muestras. Las muestras fueron analizadas mediante espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-QMS 7900, en la plataforma PARI del instituto de física global, Paris, Francia). La concentración de estos elementos fue estandarizada a flujo diario ( $\text{g de cada elemento m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ ). Calculado como el cociente de la masa de cada elemento y el producto del área de muestreo de la trampa de sedimentos y el periodo de recolección de esta. Para inferir la variabilidad en las probables fuentes de aporte terrígeno (fluvial-eólica) se calcularon las proporciones Ti/Al y Zr/Al (g/g). La proporción Ti/Al ha sido utilizada como indicadora de aporte fluvial asociado a la precipitación (Haug et al. 2003; Martinez et al., 2007); mientras que, la proporción Zr/Al se ha utilizado como indicadora de aporte eólico (Pérez-Cruz 2013).

### ***Precipitación***

La precipitación es uno de los factores ambientales que influye en el aporte de material terrígeno encontrado en las trampas de sedimento y fue utilizado como un parámetro de comparación con los flujos de elementos indicadores de aporte terrígeno. Los valores de precipitación quincenal (mm) que se reportan en este estudio, corresponden a la sumatoria quincenal de los valores diarios de precipitación obtenidos de la estación meteorológica con clave: 76458 de Mazatlán, Sinaloa del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), localizada a los 23° 13'02" N y los 106° 24' 40".

### ***Descarga de ríos***

El aporte de ríos es otro factor que puede afectar los flujos de material terrígeno en el área de estudio y también se utilizó como un parámetro de comparación. Los ríos más cercanos al punto donde se encuentra la trampa de sedimentos y que podrían contribuir con el aporte terrígeno desembocan en las costas de Sinaloa, cerca de la ciudad de Mazatlán. La desembocadura del río El Quelite, a 25 millas náuticas al noreste de la trampa de sedimentos, la del río Presidio, a 25 millas náuticas al este de la trampa de sedimentos y la del río Baluarte, a 40 millas náuticas al sureste de la trampa de sedimentos. Los valores de descarga quincenal de estos ríos utilizados en este estudio son datos de reanálisis y se descargaron valores diarios para el periodo de enero de 2015 a febrero de 2019 de la base de datos Copernicus Europe's eyes on Earth, los datos corresponden a valores de flujo ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ), se realizó una sumatoria quincenal de estos datos para construir series de tiempo con la misma resolución temporal que la de los datos de la trampa de sedimentos.

### ***Correlación entre las variables***

Para confirmar estadísticamente la relación entre los flujos de elementos, la precipitación, la descarga de los ríos y el MEI, se realizaron análisis de correlación de Pearson entre estas variables y para conocer si hubo diferencias significativas durante el periodo de muestreo, se realizó un análisis de varianza de una vía ANOVA.

## Resultados

### *Flujo de elementos de aporte terrígeno*

Los valores de flujo de Ti, Al, Fe y Zr covarían entre sí y muestran un patrón general estacional, en el que durante los meses de julio a septiembre se presentan los valores más altos y de enero a mayo los valores más bajos. Las diferencias entre los años analizados corresponden a valores más altos durante el verano de 2015 ( $F = 15.04$   $p < 0.05$ ) con respecto a los demás años (Fig. 1).

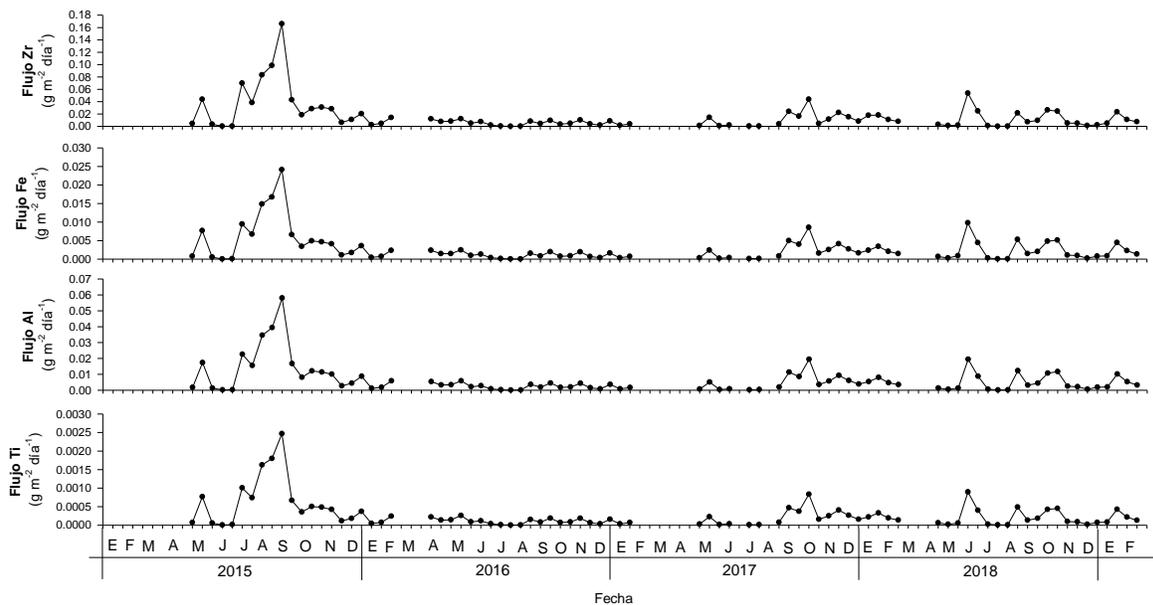


Figura 1. Flujos de elementos Ti, Al, Fe y Zr de mayo de 2015 a febrero de 2019.

### *Precipitación y descargas de ríos*

El patrón anual de precipitación en Mazatlán durante el periodo de muestreo indica que la temporada de lluvias normalmente inicia en julio y se extiende hasta octubre, los valores máximos se presentan en agosto y los valores mínimos ocurren de enero a mayo (Fig. 2). Los valores de descarga de los ríos El Quelite, Presidio, Baluarte y la sumatoria de los tres, tienen un patrón muy similar al de la precipitación (Fig. 2), la descarga de los ríos presentó una correlación positiva y significativa ( $r > 0.60$ ,  $p < 0.5$ ) con la precipitación en Mazatlán.

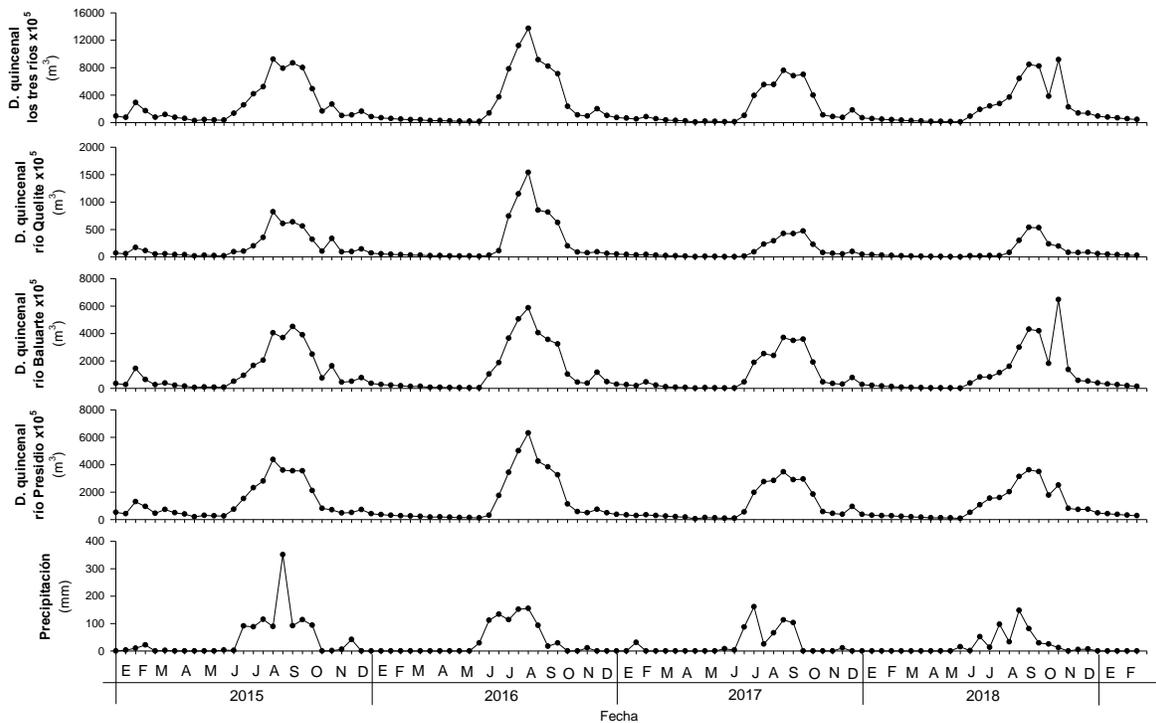


Figura 2. Precipitación quincenal en Mazatlán, descarga quincenal de los ríos Presidio, Baluarte, Quelite y la sumatoria de estos tres de enero de 2015 a febrero de 2019.

## Discusión

### *Variación estacional*

El patrón estacional de la precipitación en Mazatlán muestra que la temporada de lluvias es principalmente en verano e inicios de otoño, cuando los vientos dominantes son más débiles y del suroeste (Fig. 3). Mientras que, la temporada de secas ocurre durante el invierno y la primavera cuando los vientos dominantes son más fuertes y del noroeste (Fig. 3), los niveles de descarga de los ríos covarían con las lluvias ( $r > 0.60$ ,  $p < 0.05$ ), lo que sugiere que las condiciones meteorológicas en la región influyen sobre las descargas de los ríos analizados (Fig. 2). En cuanto a los aportes de material terrígeno, se observó que los valores de los flujos de Al, Ti, Fe y Zr también aumentan durante los meses de verano, cuando la precipitación y los niveles de descarga de los ríos aumentan, esta observación fue confirmada estadísticamente por coeficientes de correlación de Pearson,  $r >$

0.36,  $p < 0.05$  entre la precipitación y los flujos y con valores de  $r > 0.33$ ,  $p < 0.05$  entre las descargas de ríos y los flujos de los elementos indicadores de aporte terrígeno.

En la BGC los cambios estacionales en la circulación atmosférica, los patrones de precipitación y de descargas de ríos son influenciados por diferentes factores, como son el Monzón mexicano (Badan-Dangon et al., 1991; Higgins et al., 2003; Bordoni et al., 2004), la posición latitudinal de la ZCIT (Amador et al., 2006) y la actividad de tormentas tropicales y huracanes en el Pacífico mexicano (Magaña et al., 1999; Amador et al., 2006).

El Monzón mexicano determina los patrones de velocidad del viento y precipitación en el Golfo de California y el suroeste de Estados Unidos, este sistema de vientos reversibles depende de la posición e intensidad del centro de alta presión del Pacífico (Badan-Dangon et al., 1991). Durante el invierno y primavera el centro de alta presión se localiza a los  $30^{\circ}$  N en el Pacífico nororiental, lo cual genera un gradiente de presión a lo largo del Golfo de California, que produce vientos del noroeste, que al ser canalizados entre los sistemas montañosos de la península de Baja California y los estados de Sonora y Sinaloa se intensifican, estos vientos provienen del continente y contienen poca humedad, por lo que durante esta época la precipitación disminuye (Badan-Dangon et al., 1991; Higgins et al., 2003; Bordoni et al., 2004). Durante el invierno y primavera, la ZCIT se localiza en su posición más al sur, por lo que la actividad convectiva y la formación de nubes profundas queda alejada del noroeste de México (Magaña et al., 1999), por lo que la precipitación asociada a la ZCIT disminuye en la BGC. Durante esta época la influencia de tormentas tropicales y huracanes en el Pacífico mexicano es mínima y consecuentemente la precipitación asociada también disminuye (Magaña et al., 1999; Amador et al., 2006). La combinación de estos factores determina que durante el invierno y primavera se presente la época de secas con vientos fuertes dominantes del noroeste. Por lo tanto, el aumento en la velocidad del viento del noroeste y la disminución de la precipitación acompañado por la disminución en los flujos de elementos indicadores de aporte terrígeno durante los meses de invierno y primavera encontrados en este estudio (Fig. 3), reflejan la dinámica de la época de secas en la BGC.

Durante el verano y el otoño, debido a la alta insolación en el hemisferio norte, un centro de baja presión se forma en el desierto de Sonora; mientras que, en el sur del golfo la presión atmosférica es mayor, lo que genera un gradiente de presión entre el continente y el mar que promueve vientos del sureste a lo largo del Golfo de California, estos vientos de origen marino transportan humedad en forma de oleadas hacia las costas de Sonora y Sinaloa, por lo que la precipitación aumenta

(Badan-Dangon et al., 1991; Higgins et al., 2003; Bordoni et al., 2004). Se ha observado que, en la BGC el monzón no es completamente simétrico ya que los vientos de verano suelen ser del suroeste, debido a que a esta latitud el Golfo de California es más ancho y los vientos no se encuentran canalizados a lo largo del eje del golfo, por lo que su magnitud y dirección es más variable, siendo predominantes vientos débiles del suroeste (Roden, 1958; Pares-Sierra 2003; Bordoni et al., 2004). Durante esta época la ZCIT se localiza más hacia el norte, lo que favorece la convección y formación de nubes profundas que incrementan la precipitación en las costas del Pacífico mexicano (Magaña et al., 1999; Amador et al., 2006). Además, durante el verano y el otoño la precipitación en la BGC puede aumentar debido al incremento en la actividad de tormentas tropicales y huracanes en el Pacífico mexicano (Magaña et al., 1999). Los valores bajos de velocidad del viento del suroeste, los aumentos en la precipitación y descarga de ríos, así como el aumento en los flujos de elementos indicadores de aporte terrígeno durante los meses de verano y otoño observados en este estudio (Fig. 3), reflejan la dinámica de la época de lluvias en la BGC.

El patrón estacional en los flujos de elementos indicadores de aportes terrígenos encontrados en la BGC es consistente con los registros de trampas de sedimento de las cuencas de Guaymas (Thunell 1998) y Alfonso (Siverberg et al., 2007) en el Golfo de California y con el de la Cuenca Cariaco, Venezuela (Martinez et al., 2007; Elmore et al., 2009). En estos registros los cambios en los indicadores de material terrígeno fueron asociados a variaciones estacionales en el régimen de precipitación. Por lo tanto, los cambios en los flujos de Al, Ti, Fe y Zr encontrados en este estudio, podrían ser buenos indicadores de la variación estacional en el régimen de precipitación en la BGC.

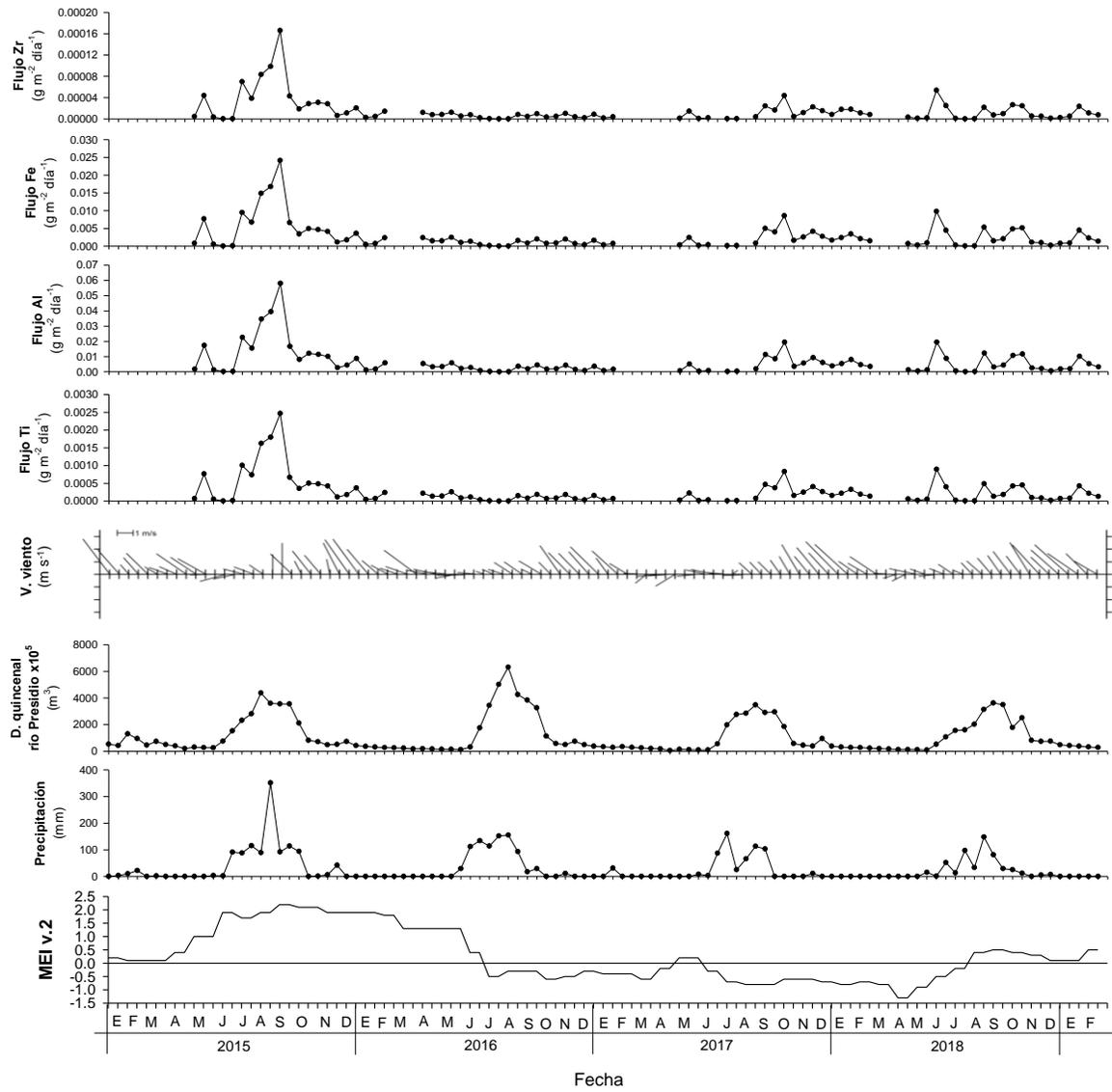


Figura 3. Índice Multivariado ENSO, precipitación quincenal en Mazatlán, descarga quincenal del río Presidio, velocidad del viento y flujos de Ti, Al, Fe y Zr de enero de 2015 a febrero de 2019.

### ***Variación interanual***

Los patrones de precipitación y de la descarga de los ríos analizados no presentaron diferencias significativas entre los cuatro veranos analizados ( $F < 0.8$ ,  $p > 0.05$ ), aunque a inicios de septiembre de 2015 se observó un aumento en la precipitación de hasta 353 mm (el valor más alto durante todo el periodo de muestreo); sin embargo, éste fue un valor aislado que no produjo diferencias significativas con respecto a los otros veranos (Fig. 3). Tampoco se observó un aumento en la descarga de los ríos que corresponda a este aumento aislado en la precipitación de inicios de septiembre de 2015 (Fig. 3). Durante el verano y otoño de 2015 el MEI indica que El Niño Godzilla alcanzó su máxima intensidad y coincide con el valor más alto de precipitación durante todo el periodo de muestreo (Fig. 3).

Los flujos de Al, Ti, Fe y Zr fueron significativamente mayores durante el verano de 2015 ( $F > 6.0$ ,  $p < 0.05$ ) y coinciden con la presencia y máxima intensidad de condiciones El Niño Godzilla 2015-2016, así como con el incremento en la precipitación de inicios de septiembre de 2015 (Fig. 3). El MEI presentó una correlación positiva y significativa con los flujos de los elementos indicadores de aporte terrígeno ( $r > 0.35$ ,  $p < 0.05$ ) (Fig. 3). Además, este aumento en los flujos de los elementos indicadores de aporte terrígeno también coincide con un aumento en la velocidad del viento del norte ( $r > 0.5$ ,  $p < 0.05$ ) que durante el verano de 2015 fue significativamente mayor ( $F = 3.33$ ,  $p = 0.04$ ) con respecto a los otros veranos analizados (Fig. 3). Estos resultados sugieren que durante el verano de 2015 el aumento en la contribución de aportes continentales a la BGC, además de coincidir con el aumento en la precipitación en la primera quincena de septiembre, probablemente tuvo una mayor influencia de transporte eólico con respecto a los otros años analizados.

Considerando que el aporte de material terrígeno no solo se debe al transporte fluvial asociado a la precipitación; sino que también tiene una componente eólica, se construyeron series de tiempo de las proporciones Ti/Al (indicador de transporte fluvial) y Zr/Al (indicador de transporte eólico) y se compararon con las series de tiempo de precipitación, descarga de los ríos y velocidad del viento para analizar la importancia relativa entre el transporte fluvial y eólico en la BGC (Fig. 4). La proporción Ti/Al aumenta conforme aumenta la precipitación y la descarga de los ríos ( $r = 0.25$ ,  $p < 0.05$ ) y presenta valores por encima del promedio a inicios de septiembre de 2015 durante El Niño Godzilla (Fig. 4), aunque sin diferencias significativas con respecto a los otros veranos analizados ( $F = 2.12$ ,  $p > 0.05$ ), lo que sugiere que el aporte fluvial asociado a la precipitación no es el único factor relacionado con el aumento en los flujos de material terrígeno durante El Niño Godzilla 2015-2016.

En cuanto a la proporción Zr/Al, ésta aumenta cuando la velocidad del viento aumenta ( $r = 0.23$ ,  $p < 0.05$ ), durante el verano de 2015, a inicios de septiembre cuando se presentó el aumento anómalo en la velocidad del viento del norte, la proporción Zr/Al fue significativamente mayor con respecto a los otros veranos analizados ( $F = 7.22$ ,  $p = < 0.05$ ) (Fig. 4), lo que sugiere que el aporte eólico probablemente tuvo una contribución importante durante el verano de 2015.

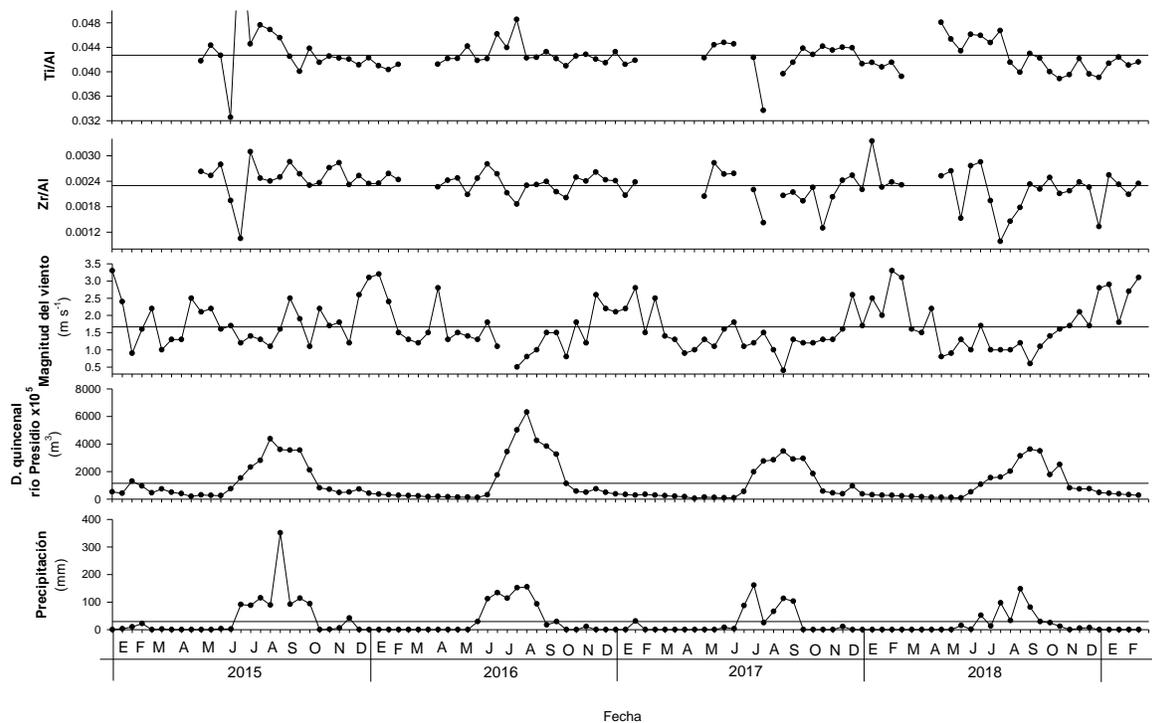


Figura 4. Precipitación quincenal en Mazatlán, descarga quincenal del río Presidio, magnitud del viento, proporción Zr/Al y Ti/Al de 2015 a 2019.

Los cambios observados en el patrón anual de velocidad del viento y precipitación reflejados por los flujos de elementos indicadores de aporte terrígeno podrían estar relacionados al fuerte evento El Niño Godzilla 2015-2016. Aunque los efectos de El Niño sobre la precipitación de verano en el noroeste de México son diferentes entre un evento El Niño y otro (Magaña et al., 1999; Pavia et al., 2006), se han observado algunas tendencias sobre los factores que determinan el patrón de precipitación en el noroeste de México:

En cuanto al Monzón mexicano, se ha observado que éste se debilita en los estados de Sonora y Sinaloa durante los veranos El Niño. Debido a que las anomalías positivas de TSM en el Pacífico mexicano disminuyen el contraste térmico entre la superficie continental y la marítima, lo que

provoca que el gradiente de presión disminuya y la actividad de las celdas convectivas sea menor, por lo que la precipitación disminuye (Higgins et al., 1999). Sin embargo, en este estudio se encontró que el viento fue más intenso y del norte, lo que probablemente también contribuyó a que los flujos de material terrígeno aumentaran durante el verano de 2015 (Fig. 4).

Con respecto a los efectos de El Niño sobre la ZCIT y la precipitación asociada de verano, también se ha observado una disminución de las lluvias en el centro y noroeste de México, debido a que durante eventos El Niño los vientos Alisios son más fuertes y la ZCIT se localiza más hacia el sur. Bajo estas condiciones, la actividad convectiva asociada a la ZCIT se encuentra más lejos del noroeste de México y la rama descendente (subsistencia) se refuerza en el norte del país, alrededor del Trópico de Cáncer, lo que inhibe la formación de nubes convectivas profundas y consecuentemente reduce la cantidad de lluvia (Magaña y Quintanar, 1997; Magaña et al., 1999).

Otro factor importante que influye sobre la precipitación de verano en las costas del noroeste de México es la actividad de tormentas tropicales y huracanes en el Pacífico tropical mexicano, la cual aumenta durante los veranos El Niño (Magaña et al., 1999; Amador et al., 2006). Este incremento en la ciclogénesis en el Pacífico mexicano durante los veranos El Niño se debe a que, con el aumento anómalo en la TSM existe una mayor cantidad de energía disponible que promueve un aumento en la velocidad de ascenso del aire (baja presión) por lo que la formación, duración e intensidad de ciclones tropicales aumenta y consecuentemente la cantidad de lluvia sobre las costas del Pacífico mexicano aumenta (Magaña et al., 1999). Este factor podría estar relacionado con los aumentos en la precipitación y en la velocidad del viento a inicios de septiembre de 2015, que fueron reflejados por los aumentos en los flujos de Al, Ti, Fe y Zr en este estudio.

Durante el verano y otoño de 2015 se formaron 22 ciclones tropicales en el Pacífico mexicano, de los cuales 13 fueron huracanes y 5 tuvieron trayectorias cercanas a la BGC (Tabla 1); mientras que, durante los otros veranos analizados el número de tormentas fue menor, excepto por el verano de 2018, cuando se presentaron 25 ciclones, de los cuales 12 fueron huracanes y 3 tuvieron trayectorias cercanas a la BGC (Tabla 1). Es importante mencionar que el verano de 2018 ocurrió bajo condiciones neutrales con tendencia positiva de acuerdo con el MEI (Fig. 3); sin embargo, de acuerdo con el Índice Oceánico El Niño (ION) éste fue un evento El Niño débil (Climate Prediction Center 2022) de tipo Pacífico Central (PC), con anomalías positivas de TSM restringidas al Pacífico Ecuatorial (Petrova et al., 2020; Wang y Cai, 2020) y probablemente ésta sea la razón por la cual el

número de huracanes, así como el número de ciclones con trayectoria cercana a la BGC fue menor que en 2015 (Tabla 1).

**Tabla 1.** Muestra el número de Depresiones Tropicales (DT), Tormentas Tropicales (TT) y Huracanes, así como la fase de ENOS de 2015 a 2018 (datos tomados de CONAGUA 2015-2018). El Niño de tipo Pacífico oriental (PO), El Niño de tipo Pacífico central (PC).

Año	DT	TT	Huracanes	Total	Ciclones con trayectoria cercana a la BGC	Fase ENOS
2015	4	5	13	22	5	El Niño PO
2016	1	10	11	22	2	Neutral
2017	2	7	10	20	4	La Niña
2018	3	10	12	25	3	El Niño PC

En particular, los aumentos en la precipitación, velocidad del viento del norte y los flujos de elementos indicadores de aporte terrígeno en la BGC a inicios de septiembre de 2015 (Fig. 3) podrían estar relacionadas con la actividad del huracán “Linda” de categoría 3, con vientos de hasta 205 km h<sup>-1</sup>, que mantuvo una trayectoria cercana a la BGC y produjo un aumento en la nubosidad en las costas de Sinaloa (CONAGUA, 2015; NASA, 2015). Al parecer la señal de El Niño Godzilla en la BGC, consistió en un aumento en la precipitación y el incremento en la velocidad del viento del norte a inicios de septiembre, que podrían estar relacionados con una mayor frecuencia e intensidad de ciclones tropicales durante el verano de 2015, lo cual fue reflejado por el aumento en los flujos de Al, Ti, Fe y Zr (Fig. 3).

Los aumentos en la precipitación relacionados con El Niño y con la actividad de ciclones tropicales han sido documentados en distintos registros de trampas de sedimento: Thunell (1998) reportó un incremento anómalo en flujo de material terrígeno (masa total menos ópalo biogénico) durante el Niño 1992 en la cuenca de Guaymas, relacionado con aumentos en la precipitación. Silverberg et al., (2007) reportaron aumentos anómalos en la concentración de Fe en la cuenca Alfonso, relacionados con el paso de los huracanes “Ignacio” y “Marty” durante el verano de 2003. Por otra parte, en la cuenca de Cariaco se observó un incremento anómalo en el flujo de material terrígeno (estimado por mineralogía y granulometría) a finales de noviembre e inicios de diciembre de 1999 y fue asociado a una inundación costera anómala (Elmore et al., 2009), que coincidió con el paso el

huracán “Lenny” de categoría 4 sobre el mar Caribe (CONAGUA, 1999). Aunque 1999 fue un año La Niña, los efectos de La Niña sobre la precipitación asociada a tormentas tropicales en el Atlántico son similares a los de El Niño en el Pacífico mexicano (la frecuencia e intensidad de ciclones aumenta) (De María y Kaplan, 1994; Magaña et al., 1999). Por lo que, los aumentos en los flujos de elementos indicadores de aportes terrígenos durante el verano de 2015 en la BGC reflejan la señal de El Niño Godzilla y podrían ser un buen indicador de eventos fuertes el Niño en el registro sedimentario.

Este estudio mostró que los flujos de elementos indicadores de aporte terrígeno en la BGC fueron influenciados por la dinámica atmosférica (precipitación, descarga de ríos y viento) de 2015 a 2019. Los cambios ambientales asociados con el fuerte evento El Niño Godzilla 2015-2016 fueron reflejados por aumentos significativos en los flujos de Ti, Al, Fe y Zr, así como por la proporción Zr/Al, lo que sugiere que durante el verano de 2015 hubo una contribución importante del aporte eólico. Para poder distinguir entre la importancia relativa de los aportes fluvial y eólico en la BGC, se recomienda que en futuros estudios se analicen también la mineralogía y granulometría en las muestras de la trampa de sedimento, esto permitirá conocer más sobre la procedencia y medio de transporte del material terrígeno encontrado en la BGC.

## **Conclusiones**

La precipitación y la descarga de los ríos en la BGC fueron mayores durante los meses de verano e inicios de otoño, con respecto a los meses de invierno y primavera, lo que indica la influencia que tienen el Monzón mexicano y el desplazamiento latitudinal de la ZCIT sobre el patrón estacional de precipitación en el área de estudio. Sin embargo, durante el verano de 2015, cuando El Niño Godzilla fue más intenso se presentó un aumento en la precipitación con respecto a los otros veranos, probablemente relacionado con un aumento en la frecuencia e intensidad de tormentas tropicales y huracanes en el Pacífico mexicano.

Los patrones de viento en la BGC también mostraron la influencia del Monzón mexicano, con vientos fuertes del noroeste durante el invierno y la primavera. Mientras que, durante el verano y el otoño los vientos predominantes fueron del suroeste y más débiles. Los cambios en este patrón anual fueron incrementos en la velocidad del viento del norte a finales del verano de 2015 y probablemente están relacionados con El Niño Godzilla.

Los flujos de elementos indicadores de aporte terrígeno aumentaron durante la época de lluvias y disminuyeron durante la época de secas, reflejando el patrón estacional de precipitación y descarga de los ríos en la BGC. Los incrementos en la precipitación y velocidad del viento del norte a finales del verano de 2015 bajo condiciones de El Niño Godzilla, también se reflejaron en el aumento en los flujos de Al, Ti, Zr y Fe, que fueron significativamente mayores que en los otros veranos analizados.

Los resultados de este estudio muestran que El Niño Godzilla 2015-2016 produjo cambios en el patrón anual de precipitación y velocidad del viento en la BGC. Relacionados probablemente con el aumento en la frecuencia e intensidad de tormentas tropicales y huracanes, así como con cambios en la posición e intensidad de los centros de alta y baja presión que determinan la velocidad del viento en la BGC.

## Bibliografía

- Amador, J.A., Alfaro, E.J., Lizano, O.G., Magaña, V.O., 2006. Atmospheric forcing of the eastern tropical Pacific: a review. *Progress in Oceanography*. 69, 101–142.
- Badan-Dangon, A., Dorman, C.E., Merrifield, M.A., Wianat, C.D., 1991. The lower atmosphere over the Gulf of California. *Journal of Geophysical Research*. 96 (c9), 16887–16896.
- Bordoni, S., Ciesielski, P., Johnson, R., McNoidy, B., Stevens, B., 2004. The low-level circulation of the North American Monsoon as revealed by QuikSCAT. *Geophysical Research Letters*. 31 (L10109). <http://dx.doi.org/10.1029/2004GL020009>.
- Climate Prediction Center Internet Team, 2022. Cold & Warm Episodes by Season [WWW Document]. NOAA/ Natl. Weather Serv. Natl. Centers Environ. Predict. Clim. Predict. Cent. URL [https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis\\_monitoring/ensostuff/ONI\\_v5.php](https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php) (acceso 05-14-22).
- CONAGUA, 1999. Resumen de la Temporada de Ciclones Tropicales 1999. <https://smn.conagua.gob.mx/es/ciclones-tropicales/informacion-historica>
- CONAGUA, 2015. Resumen de la Temporada de Ciclones Tropicales 2015. <https://smn.conagua.gob.mx/es/ciclones-tropicales/informacion-historica>
- CONAGUA, 2016. Resumen de la Temporada de Ciclones Tropicales 2016. <https://smn.conagua.gob.mx/es/ciclones-tropicales/informacion-historica>
- CONAGUA, 2017. Resumen de la Temporada de Ciclones Tropicales 2017. <https://smn.conagua.gob.mx/es/ciclones-tropicales/informacion-historica>
- CONAGUA, 2018. Resumen de la Temporada de Ciclones Tropicales 2018. <https://smn.conagua.gob.mx/es/ciclones-tropicales/informacion-historica>
- De Maria M., J. Kaplan, 1994. Sea surface temperature and the maximum intensity of Atlantic tropical cyclones. *J. Climate*, 7, 1325-1334.
- Elmore, A., Thunell, R., Styles, R., Black, D., Murray, R., Martinez, N., Astor, Y. 2009. Quantifying the seasonal variations in fluvial and eolian sources of terrigenous material to Cariaco Basin,

- Venezuela. *Journal of South American Earth Sciences*. 27. 197-210. 10.1016/j.jsames.2008.11.002.
- Haug, G.H., Günther, D., Peterson, L.C., Sigman, D.M., Hughen, K.A., Aeschlimann, B., 2003. Climate and the collapse of the Maya civilization. *Science* 299, 1731–1735.
- Higgins, R.W., Chen, Y., Douglas, A. 1999: Interannual variability of the North American warm season precipitation regime. *J. Climate*. 12, 653-680
- Higgins, R.W., Douglas, A., Hahmann, A., Berbery, E.H., Gutzler, D., Shuttleworth, J., Stensrud, D., Amador, J.A., Carbone, R., Cortez, M., Douglas, M., Lobato, R., Meitin, J., Ropelewski, C., Schemm, J., Schubert, S., Zhang, C., 2003. Progress in Pan American CLIVAR research: the North American Monsoon System. *Atmosfera* 16, 29–65.
- Magaña, V., 1999. *Los Impactos de El Niño en México*. Dirección General de Protección Civil, Secretaría de Gobernación, México. (229 pp.).
- Magaña V., Quintanar, A. 1997: *On the use of a general circulation model to study regional climate*. 2nd. UNAM-CRAY Supercomputing Conference Earth Sciences. Mexico City. June 1997. Ed. Cambridge University Press. 39-48
- Martinez, N.C., Murray, R.W., Thunell, R.C., Peterson, L.C., Muller-Karger, F.E., Astor, Y., Varela, R., 2007. Modern climate forcing of terrigenous deposition in the tropics (Cariaco Basin, Venezuela). *Earth Planet Res. Lett.* 264 (3–4), 438–451.
- NASA, 2015.<https://lance.modaps.eosdis.nasa.gov/cgi-bin/imagery/single.cgi?image=Linda.A2015251.2110.250m.jpg>
- Pares-Sierra, A., Mascarenhas, A.S.J., Marinone, S., Castro, R., 2003. Temporal and spatial variation of the winds in the Gulf of California. *Geophysical Research Letters* 30 (6), 1312.
- Pavia, E.G., Graef, F., Reyes, J., 2006. PDO–ENSO effects in the climate of Mexico. *Journal of Climate* 19, 6433–6438
- Perez-Cruz, L. 2013. Hydrological changes and paleoproductivity in the Gulf of California during middle and late Holocene and their relationship with ITCZ and North American Monsoon variability. *Quaternary Research*. 79. 138–151. 10.1016/j.yqres.2012.11.007

- Petrova, D., Rodó, X., Sippy, R., Ballester, J., Mejía, R., Beltrán-Ayala, E., Borbor-Cordova, M.J., Vallejo, G.M., Olmedo, A.J., Stewart-Ibarra, A.M., Lowe, R., 2021. The 2018–2019 weak El Niño: Predicting the risk of a dengue outbreak in Machala, Ecuador. *Int. J. Climatol.* 41, 3813–3823. <https://doi.org/10.1002/joc.6744>
- Roden, G. I., 1958. Oceanographic and meteorological aspects of the Gulf of California, *Pac. Sci.*, 12, 21-45.
- Silverberg, N., Shumilin, E., Aguirre-Bahena, F., Rodríguez-Castañeda, A.P., Sapozhnikov, D., 2007. The impact of hurricanes on sedimenting particulate matter in the semi-arid Bahia de La Paz, Gulf of California. *Continental Shelf Research.* 27, 2513–2522
- Thunell, R., 1998. Seasonal and annual variability in particle fluxes in the Gulf of California: a response to climatic forcing. *Deep Sea Research.* 45, 2059–2083.
- Wang, G., Cai, W., 2020. Two-year consecutive concurrences of positive Indian Ocean Dipole and Central Pacific El Niño preconditioned the 2019/2020 Australian “black summer” bushfires. *Geosci. Lett.* 7. <https://doi.org/10.1186/s40562-020-00168-2>

## Capítulo 5

### Conclusiones generales

El presente estudio demostró que los patrones de las asociaciones de FP, flujos de partículas y aportes de material terrígeno encontrados en una trampa de sedimentos en la BGC reflejaron la dinámica meteorológica y oceánica estacional de 2015 a 2019.

Se presentaron los siguientes escenarios climático - oceanográficos:

- i) Un escenario de surgencias de invierno y primavera (valores altos de velocidad del viento del noroeste, menor precipitación y descarga de ríos, bajas TSM y altas *Cl-a*) caracterizado por la dominancia de la asociación *G. bulloides*, altos flujos de partículas (masa total, carbono orgánico, nitrógeno total y carbonatos) y menores concentraciones de los elementos terrígenos Al, Ti, Fe y Zr.
- ii) Un escenario de verano (valores bajos de velocidad del viento del suroeste, mayor precipitación y descarga de ríos, altas TSM y baja *Cl-a*) con asociaciones de FP dominadas por las especies cálidas *G. hexagonus* y *O. universa*-*T. sacculifer*-*G. praesiphonifera*, bajos flujos de partículas y mayores concentraciones de Al, Ti, Fe y Zr.
- iii) Un escenario transicional de finales de otoño (inicio del aumento de la velocidad del viento del noroeste, disminución de la precipitación y descarga de ríos, disminución de TSM y aumento de *Cl-a*) dominado por la especie resistente a la turbulencia *G. glutinata*, el aumento en los flujos de partículas y la disminución en las concentraciones de Al, Ti, Fe y Zr.

Este patrón general fue modificado por el fuerte evento El Niño Godzilla 2015-2016, cuando los valores de invierno de TSM fueron los más altos y los de *Cl-a* los más bajos de todo el registro y la asociación *G. tenellus* fue dominante durante el periodo de máxima intensidad de El Niño, indicando la intrusión y predominancia de aguas cálidas y oligotróficas. Esta asociación podría ser un buen indicador de eventos fuertes El Niño en el registro sedimentario de la BGC.

Los patrones de precipitación y velocidad del viento también fueron modificados por El Niño Godzilla 2015-2016, ya que, a inicios de septiembre, durante el verano de 2015 se presentaron los valores más altos de precipitación y rapidez del viento del norte, lo que fue reflejado por aumentos significativos en las concentraciones de Al, Ti, Fe y Zr.

Este estudio revela los efectos de ENOS sobre la dinámica meteorológica y oceánica de la BGC. Ayuda en la comprensión de cómo éstos influyen sobre las asociaciones de FP, el flujo de partículas y el aporte de terrígenos. La integración de información procedente de imágenes de satélite con asociaciones de FP, indicadores geoquímicos de productividad primaria, aportes terrígenos e información meteorológica, provee herramientas útiles para la interpretación de eventos ENOS en el registro sedimentario de la BGC, lo cual ayuda a reconocer el comportamiento de este fenómeno a largo plazo.